6G：
极简多能，
构建移动的世界

A versatile 6G with minimized kernel:
To build the mobile world

OPPO 6G 白皮书

oppo

1.0 6G “极简多能”系统总体概念

1.1 6G 在移动通信发展中的历史使命 04
1.2 5G 对“世界移动化”的初步探索与经验教训 05
1.3 6G“极简多能”系统设计新思路 06
1.3.1 对信息化世界的两个新发现 06
1.3.2 6G = 极简核心 +N 个子系统 08

2.0 6G 极简核心

2.1 6G 极简核心之内生智能 11
2.1.1 6G 网络的智能维度 12
2.1.2 基于 6G 内生智能的按需组网 13
2.1.3 基于 6G 内生智能的智能化替代 14
2.2 6G 极简核心之安全 16
2.2.1 6G 时代的变化及安全趋势 16
2.2.2 6G 时代关键安全技术 17
2.2.3 6G 时代零信任安全架构 18
2.3 6G 极简核心之灵活频谱共享 19

3.0 6G 宽带蜂窝子系统

3.1 6G 宽带蜂窝 KPI 指标要求 22
3.2 6G 宽带蜂窝关键技术与系统设计 23
3.3 6G 空口的 AI 化替代 25

4.0 6G D2D 子系统

4.1 6G D2D KPI 指标要求 29
4.2 6G D2D 关键技术与系统设计 30
4.2.1 基于 AI 的 D2D 系统设计 30
4.2.2 太赫兹技术 33
4.2.3 可见光通信 35

5.0 6G 低时延高可靠子系统

5.1 6G 低时延高可靠 KPI 指标要求 38
5.2 6G 低时延高可靠关键技术与系统设计 39

6.0 6G 感知子系统

6.1 6G 感知 KPI 指标要求 41
6.2 6G 感知关键技术与系统设计 42
6.2.1 6G 感知子系统的两种模式 42
6.2.2 通信感知融合系统的关键技术 43
6.2.3 独立感知模式关键技术 46

7.0 6G 超大规模 IoT 子系统

7.1 6G 超大规模 IoT 技术需求 48
7.1.1 技术需求 48
7.1.2 KPI 指标要求 49
7.2 6G 超大规模 IoT 关键技术与系统设计 50

8.0 6G 空天通信子系统

8.1 6G 空天通信 KPI 指标要求 54
8.2 6G 空天通信关键技术与系统设计 55

9.0 总结 59

参考文献 61

1.0 6G “极简多能”系统总体概念

- 6G在移动通信发展中的历史使命
- 5G对“世界移动化”的初步探索与经验教训
- 6G“极简多能”系统设计新思路
- 对信息化世界的两个新发现
- 6G =极简核心+N个子系统

6G 在移动通信发展中的历史使命

1.1

移动通信技术十年一代，都需要担当相应的历史角色。那么，在经历了五代发展之后，第六代移动通信技术 (6G) 又将在移动通信发展进程中承担何种历史使命呢？我们首先需要探讨这个问题。

通信是一门应用学科，与基础科学研究不同，其最终目标不仅是“探索、解释自然定律”，更重要的是满足人和社会的信息化需求，同时获得合理的市场回报，推动信息产业和信息社会的持续健康发展。因此，以需求驱动确定每一代的创新方向，移动通信技术演进才能不断取得成功。

回顾从 1G 到 5G 的发展历程，可以看到，**移动通信实际上并不是通过一代技术实现一次产业升级，而是每两代技术实现一个大的产业升级目标：**

- **1G 和 2G 实现了“移动的话音”，即无所不在的话音接入；**
- **3G 和 4G 实现了“移动的数据”，即移动互联网接入；**
- **5G 和 6G 的目标是实现“移动的世界”，即千行百业都接入网络，实现所有垂直行业的万物互融。**

2G、4G 相对 1G、3G 更成功的原因，是作为一个大的升级阶梯的“后半步”，针对 1G、3G 在“前半步”暴露出来的问题和差距，有针对性的驱动技术革新，最终完整实现了产业升级目标。

5G 和 6G 致力于一个非常宏大产业升级目标，即实现整个世界的移动化。但受限于需求定义的不完整性和技术的不成熟性，5G 只阶段性地实现了从“互联”到“物联”的突破，距离万物互融的最终愿景还有较大差距。因此，**6G 的历史使命，是基于 5G 的经验教训，彻底实现“移动的世界”的目标。**

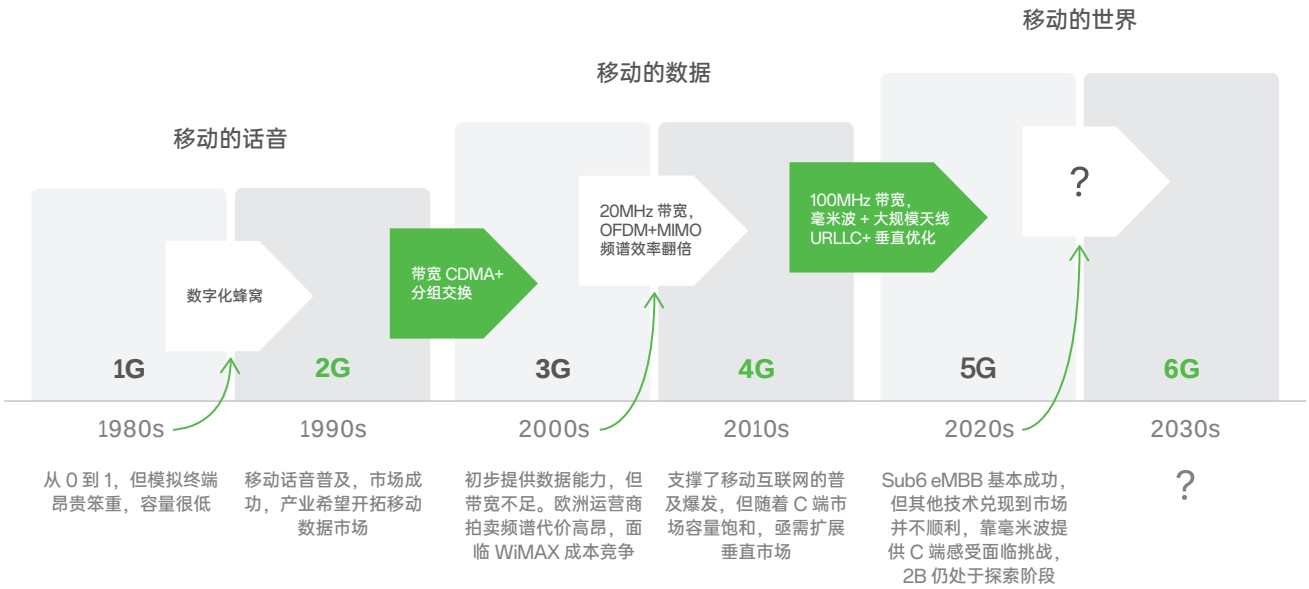


图 1-1：移动通信的代际演进历程

5G 对“世界移动化”的初步探索与经验教训

1.2

探讨 5G 的经验教训，首先要回溯一下 5G 的“初心”，即回到 2015 年，我们想设计一个怎样的 5G 移动通信系统。5G 的设计定位与 4G 最大的不同，是要将移动通信系统从一个为人服务的“单一功能系统”扩展为一个“多能系统”（Versatile System），以覆盖人（即 eMBB）、机（即 URLLC）、物（即 mMTC）三大场景的云连接，实现物理世界的万物互联。

但在如何设计这个“多能系统”的问题上，5G 既有经验也有教训。

一方面，5G 没有盲目追求无线传输底层技术的“替代性变革“，大量继承了在 4G 中获得成功的 OFDM（正交频分复用）和 MIMO（即多天线传输）等核心技术，而将创新重心放在向各种业务场景、垂直应用的“横向扩展”上，着重在“低时延、高可靠、大容量”等方面进行了优化，总体设计目标是符合市场需求和产业发展趋势的。

但另一方面，**5G 仍然基于“单一功能系统”的系统设计原则，面向一套“刚性管道指标”（即高速率 + 低时延高可靠），在技术上追求一体化设计，尝试通过“多参数集 + 网络切片”兼顾千行百业的细分业务需求。但由于 5G 各垂直技术均以 eMBB 作为基线（baseline）和缺省设计，限制了技术创新空间，无法针对目标垂直领域做彻底优化，在很多垂直领域并未实现比较优势和可控成本。**

首先，5G eMBB 通过引入毫米波传输，试图以高频段换取大带宽，实现更高传输速率。但毫米波信号只满足视距（Line-of-Sight，LOS）传输，造成覆盖范围、应用场景有限，对 5G eMBB 整体性能的提升贡献不多。5G eMBB 试图以大规模天线技术提高频谱效率，但过多的天线数量在很多部署场景中性能提升并不明显，却造成基站复杂度、能耗、工程难度的大幅上升。

随后，URLLC 继承了 eMBB 模式的核心设计，只是通过局部优化来提升时延、可靠性等性能指标，造成 URLLC 模式的复杂度在 eMBB 基础上叠加提升，对网络和终端的软硬件能力要求很高，成本控制面临很大挑战。

最后，针对 mMTC 应用场景，5G 也没有专门设计，而仅是在 eMBB 核心设计基础上做了一系列裁剪，形成“轻量化 5G”（RedCap）模式。但功耗、成本降低幅度有限，性价比相对 4G 系统并没有明显优势，难以实现真正的万物互联。

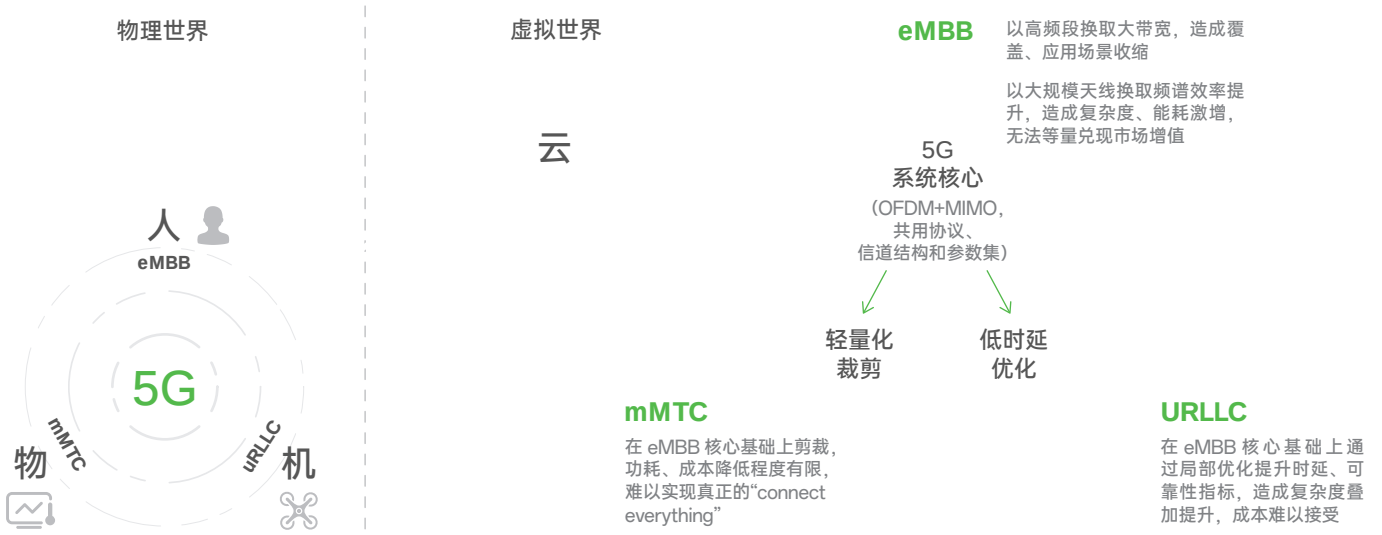


图 1-2： 5G 系统设计的经验教训

6G “极简多能”系统设计新思路

1.3

1.3.1 对信息化世界的两个新发现

之所以说相对 5G，6G 更可能最终完成实现“移动的世界”的历史使命，一方面是因为可以从 5G 汲取经验教训，改善提高，另一方面是因为相对十年前定义 5G 目标的时候，现在的信息产业界对如何全面实现世界的数字化、信息化有了更加清晰的认识。 总的来说可以归结为两大发现：

第一个发现：构建移动的信息化世界，必须引入 AI（人工智能）智能体作为人、机、物之间的中间管理者。

首先，经过过去十年的探索，业界认识到，仅靠 5G 将大量无智能的机和物连接起来，并不能实现真正的世界移动化，因为人的感官能力和人脑的处理能力是有限的，少量人脑难以管理、控制海量机器完成工作，即使“万物互联”，也不能“万物互融”。 在少量人脑和海量的机和物之间，还必须有大量的非人类智能体来作为“中间管理者”，少量人脑授权大量智能体管理海量的机与物，大量智能体通过学习和训练成为人类控制信息化世界的媒介。

通过 AI 智能体来控制信息化世界，不仅可以将人脑从“数据爆炸”的负担中解脱出来，还可以把信息化世界管理的更好。 近些年来，AI 在图像、语音识别、大数据分析管理方面获得的巨大成功，就是人脑通过 AI 智能体控制信息化世界的成功范例。

而 5G 在直接连接少量人脑和海量机与物时碰到的“数据率、时延、可靠性”瓶颈，也可望在 6G 时代得到缓解，因为人脑与 AI 智能体之间的交互虽然需要很高数据率，但未必需要“随时随地”； 而 AI 智能体与海量机和物之间的交互虽然需要海量的链接，但未必需要极低的时延和超高的可靠性。

图 1-3： 5G 时代与 6G 时代对信息化世界的不同理解

第二个发现： 构建移动的信息化世界，必须为机、物、智能体构建一个与物理世界对应的虚拟世界。

在 5G 概念形成的十年前，我们对虚拟世界的理解就是“一朵云”，即把海量的机与物统统连接到云端，供人访问和管理。 **在 6G 时代，如果人类将通过 AI 智能体对信息化世界进行控制与管理，则需要构建一个更完整、与物理世界对应性更好的虚拟世界，AI 智能体可通过其在虚拟世界的孪生镜像控制海量机和物的镜像，进而控制物理世界的机和物。**

有些 AI 智能体在物理世界有真实存在（如智能手机、机器人、智能车、无人机等），有些没有（如虚拟 AI 助手），但任何 AI 智能体都有存在于虚拟世界的孪生智能体，因为 AI 算法终归是一种软件程序。 因此通过 AI 智能体对海量机和物的控制，更适合在虚拟世界实现，即用数字孪生的方式在虚拟世界构建海量机和物的镜像，通过控制其虚拟镜像，实现对物理世界的控制。 近几年来，**元宇宙之所以得到广泛关注，除了可以带给人类逼真的沉浸式多媒体娱乐体验，更重要的是描述了一种“通过虚拟世界管理物理世界、通过经营虚拟世界创造更美好的物理世界”的广阔前景，为“万物互融”提供了一种可能的实现途径。**

图 1-4： 5G 时代与 6G 时代对虚拟世界的不同理解

当然，通过人工智能和元宇宙实现数字化世界，是一个宏大复杂的工程，需要整个信息产业乃至全社会长期的投入与建设，但 6G 技术至少可以先为这个宏大工程提供一个信息交互的基础，为移动信息化世界构建一个技术底座。 因此我们认为，**6G 的愿景应该是： 沟通虚实世界的智能体，实现两个世界的互通互融，成为元宇宙的基础设施，为移动信息化世界提供一个技术底座。**

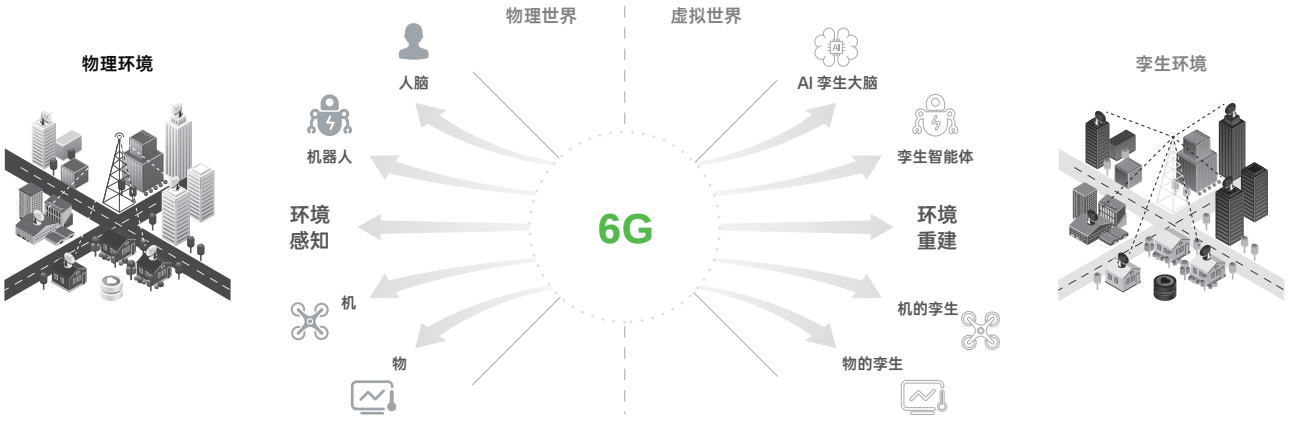


图 1-5： 6G 愿景，是沟通虚实世界，成为元宇宙的基础设施

1.3.2 6G = 极简核心 +N 个子系统

6G 作为沟通物理世界和虚拟世界的通道，需要对物理世界的全面映射能力。 因此除了具备 5G 已有的大带宽、低时延、高可靠的数据传输能力，还应扩展对无所不在的无源物体的连接能力和对物理环境的感知能力。

这将是一个远比 5G 更加“多能”的移动通信系统。 而完全基于融合一体设计的 5G 系统的有限“多能化”目标尚未完全在市场实现，物理世界“万物互联”的目标远未达到，沿既有发展路线，按一个“大号 5G 系统”来设计 6G，更难以实现 6G 宏大愿景。

6G 要实现物理世界和虚拟世界的“互通互融”，真正实现“系统多能化，世界移动化”，进一步扩展到通感、空天、零功耗等应用场景，以可控的成本实现在各个维度上几倍的性能提升，必须要采用新的设计思路。

而要成为构建与物理世界对应的虚拟世界的基础设施，必须适应物理世界的存在形式与现实构成。 在物理世界中，面对空天陆海的自然和城乡环境、由繁至简的各种终端形态、千行百业的多变业态，从来不曾存在一个单一化的基础设施可以以可控的成本普适于大千世界的，6G 也不应该例外。

在产业界对 6G 的愿景中，6G 系统一方面要在比 5G 更广泛的应用场景下实现比 5G 更高的系统性能，另一方面还要实现一个“极简”的系统，显著降低部署和运营成本，从而在千行百业真正实现落地普及。 面对这一看似矛盾的设计目标，唯一可行的解决方案只能是： 在一个极简的共性技术核心上，设计若干有限融合的子系统，容许各个场景的 6G 系统适度解绑、各自优化，实现一个“能力按需分配、功能灵活组合”的“极简多能”的 6G 系统。

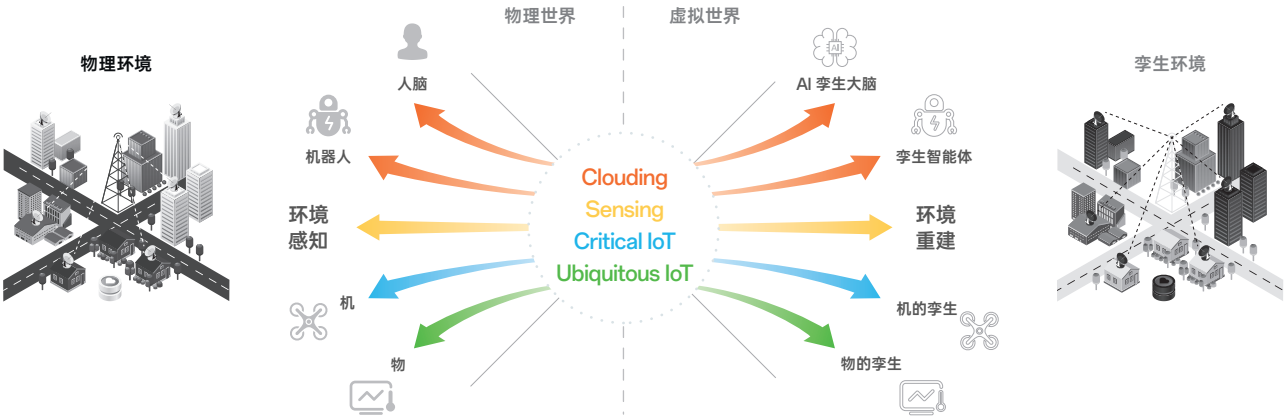


图 1-6： 适应物理世界的存在形式，设计有限融合的子系统集，实现真正“极简多能”的 6G

在我们看来，6G 极简多能系统的设计主要包含如下要素：

- 由一个最小化的极简核心提供内生智能、安全、灵活频谱管理等共性能力；

  针对四个不同能力方向做专门优化，包括：云连接（Clouding）、关键物联（Critical IoT）、泛在物联（Ubiquitous IoT）和感知（Sensing）。

- 在每个能力方向上设计一到两个子系统，可以根据应用场景、频谱、接口类型等独立选择关键技术，分别进行硬件系统设计。如可分为：6G 宽带蜂窝、6G D2D、6G URLLC、6G 定位与感知、6G 大规模物联网、6G 空天通信等子系统。
- 子系统之间按需选择是否保持空口兼容性，按需确定多大程度与 6G 宽带蜂窝子系统共用空口技术与硬件设计。
- 以黑箱化、专业化的 AI 算法库替代通用而复杂的传统软件算法，实现各子系统的“相对独立、各自优化”和通信协议的大幅简化。通过多种 AI 算法的切换和组合，实现多个子系统的切换和组合。

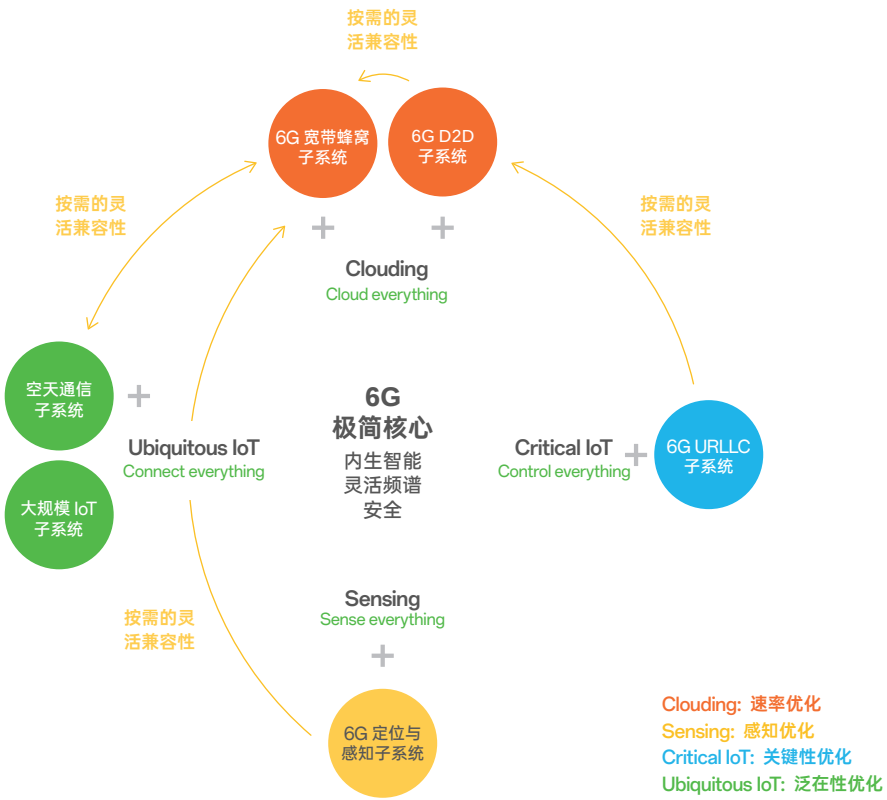


图 1-7： 6G=1 个极简核心 +N 个子系统

需要说明的是，5G 系统也曾试图通过网络切片、网络虚拟化等技术实现多种场景和功能的灵活重配和资源组合。但由于其完全基于相同的底层传输技术，仅在参数、配置层面可以灵活重配，其对不同场景和垂直行业的适配是很有限的，反而由于兼顾不必要的 KPI 指标，使每个场景的切片都有“过设计”和成本过高的问题。5G-Advanced 技术在对各垂直行业进行深度优化，但大部分情况会引入额外的复杂度，同时又无法对共性技术底座（即 eMBB 模式中的必选特性）做必要的“减法”，造成系统复杂度进一步增大。一个例外是，RedCap（轻量化 5G）技术正在面向低成本物联网，对部分冗余的硬件能力做裁剪，但由于裁剪的基线（baseline）仍是全能力的 eMBB 模式，经过长时间的工作也很难裁剪到位，实现市场期望的极低成本。

因此在 6G 系统设计中，应从一开始就考虑各个场景的实际需求，选择适当的 KPI 子集，直接设计面向应用场景优化的子系统。在本白皮书的后续章节中，我们将分别介绍我们对 6G 极简核心及各个子系统的初步考虑。

- 6G极简核心之内生智能
- 6G网络的智能维度
- 基于6G内生智能的按需组网
- 基于6G内生智能的智能化替代
- 6G极简核心之安全
- 6G时代的变化及安全趋势
- 6G时代关键安全技术
- 6G时代零信任安全架构
- 6G极简核心之灵活频谱共享

2.0 6G 极简核心

6G 极简核心是实现 6G 极简多能系统的最关键的部分，每个子系统都或多或少需要使用极简核心提供的共性能力和资源，但为了有效降低每个 6G 子系统的复杂度和成本，这个极简核心应该只包含最小化的共性能力。 在我们看来，它可以仅包含如下三个能力：

- 内生智能
- 安全
- 灵活频谱管理

需要说明的是，6G 极简核心并不一定集中在 6G 核心网，其也可能有部分资源分布式部署在 6G 接入网节点（如 6G 基站）中。

6G 极简核心之内生智能

2.1

随着 AI 技术的日趋成熟 [1]，越来越多的关于 AI 赋能移动网络功能的研究和案例陆续出现 [2]，用 AI 赋能移动网络功能具有如下优势。

AI 赋能移动网络的优势	
优势之一 AI 的精准决策能力	根据学习样本，归纳出输入和输出之间的一般性规律是 AI 推理的优势。 面对越来越繁杂的功能和场景，人为经验很难做出快速、准确的选择，使用 AI 技术对不同场景进行具体功能的匹配，能够很好的发挥 AI 的优势。
优势之二 AI 强大的推理能力	随着网络算力的不断提升，AI 推理能力越发强大，使其不输于甚至超越了人工设计出来的算法和功能。
优势之三 AI 的自演进能力	AI 的推理功能并非一成不变，可以随着时间的推移进行自演进，不断优化推理性能，实现对性能增益的极致追求。
优势之四 AI 的迁移学习能力	训练出来的 AI 模型可根据条件的变化进行学习和调整，已达到“触类旁通”的效果，从而能够最广泛地应用于不同场景，为在多元化网络中普及 AI 技术提供可能。

AI 技术应用在移动通信网络将经历一个过程，包含 For the AI, By the AI, Of the AI 三个阶段： For the AI 阶段，网络作为传输管道支撑应用层 AI 业务； By the AI 阶段，网络的部分功能（如 eMBB 和 URLLC）可以使用 AI 技术进行有限的增强；Of the AI 阶段，AI 作为重要组成部分深度嵌入网络中实现“万智互融”的目标。 由于 5G 网络在设计之初并没有考虑 AI 赋能的问题，因此 5G/B5G 网络只能实现 For the AI 和 By the AI 阶段，而 6G 网络是实现 Of the AI 的良好契机，可以从一开始就为“万智互融”提供架构层面的支持。

2.1.1 6G 网络的智能维度

AI 技术将是 6G 网络的重要组成部分，不同于控制面对应的灵活性维度和用户面对应的性能维度，AI 技术对应的智能维度将成为 6G 网络的一个新维度。之所以称智能维度是一个全新的维度，是因为 AI 维度上对应的数据特征、价值和作用与现有的控制面和用户面功能存在明显差异 [3]：

智能（AI）维度

这是 6G 新增的一个维度，包含为各个 6G 子系统提供的 AI 服务和 AI 资源，包括 AI 数据采集、AI 模型的训练、部署、管理、传输、激活、选择、切换、配置及推理，以及提供 AI 操作所需的算力、存储、信令等资源。智能维度的性能由 AI 操作效率和优化程度决定：

AI 操作效率： 完成特定的 AI 处理任务所消耗的资源（包括使用的计算、数据和通信资源），因此 AI 操作效率与 AI 算法的选择密切相关；

AI 优化程度： 通过 AI 优化替代或部分替代 CP/UP 功能，使 CP/UP 功能数量减少或简化。

用户面功能（UP）维度

这个维度包含 6G 通信网络需要具备的用户面功能，具体可以指 3GPP 在 6G 需要标准化定义的 UP 功能。由于通感融合需求的提出，对于 6G 时代的 UP 面传输的数据，需要支持通信功能和业务功能两方面。

控制面功能（CP）维度

这个维度包含 6G 通信网络需要具备的控制面功能，具体可以指 3GPP 在 6G 需要标准化定义的 CP 功能。6G 时代的 CP 功能对于实现业务稳定性、系统响应速度有着更高的要求，也用于控制通信和业务的相关配置。

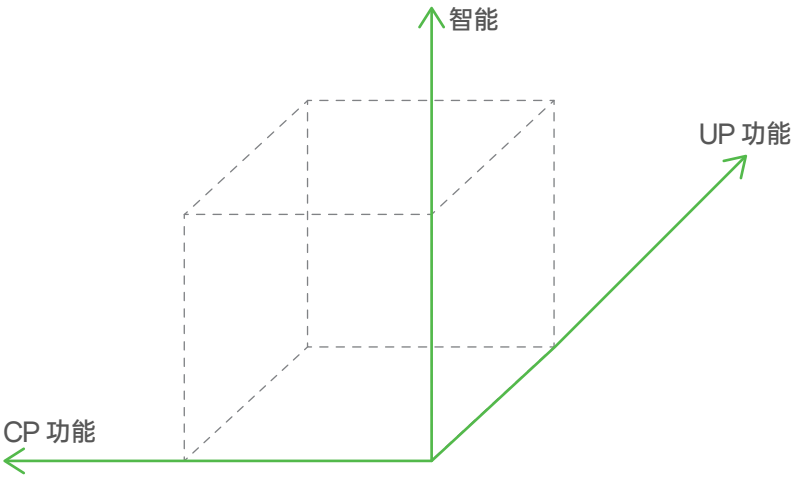


图 2-1： 6G 网络的三个维度

为了实现高效的 6G 网络架构，降低产品开发复杂度，有针对性的提升业务体验，实现“极简而又多能”的 6G 系统，极简核心内生智能应具备两大能力：按需组网和智能化替代。下面对这两大能力做简单介绍。

2.1.2 基于 6G 内生智能的按需组网

如第 1 章所述，实现 6G 系统“极简而又多能”的“两全”设计目标的唯一途径，是设计多个面向应用场景的子系统。但由子系统集构成的 6G 系统的一个核心问题，是如何能按需配置网络资源，真正为各个垂直行业部署“能力够用、成本可控”的 6G 子系统。由于千行百业的需求千变万化，这种按需组网难以靠人工方式实现，应该通过 AI 训练，采用智能化方式实现。

具备了智能按需组网能力，极简核心就可以只包含在目标场景所需的 CP、UP 和 AI 面功能：

智能维度：按需组网引擎（按场景需求选择附加的 CP、UP、AI 功能）	在极简核心的最基本功能基础上，结合场景特征，叠加额外的 CP、UP、AI 功能及技术指标 QoAIS [4]，用于某个实例化子网。CP 和 UP 功能具体指 3GPP 定义的功能，而 AI 功能具体指为了实现特定业务引入的 AI 推理模型及实现方式。
CP 维度：包含基本的注册操作连接管理	6G 网络中任何业务均需要注册和连接管理，其他附加功能按需增减，如 AIoT 设备不需要可达性连接管理能力、URLLC 设备不需要移动性能力
UP 维度：基本数据传输、基础 QoS 保障	建立连接是传递数据的最基础特征，按需附加 QoS 传输能力（如带宽、时延、可靠性等能力），以及 6G 应用业务处理能力（如应用业务数据处理能力）

极简核心中包含的功能是标准化协议上基础必选功能，比如 3GPP 必须要标准化的内容，然后根据场景特征映射成不同子网的个性化功能并实例化，就是 " 智能组网 ' 达到的效果。在极简核心基础上，我们可以把极简核心应用到某个子系统（即“按需组网”）。如图 2-2 所示。其中，6G 网络按需组网中一大特点在于从场景到网络特征的映射关系，这里我们定义场景由通信、感知和计算三大要素组成，网络由 3GPP 的 CP、UP、AI 功能和 QoAIS 组成，再进一步通过内生智能架构实现实例化的 6G 网络。

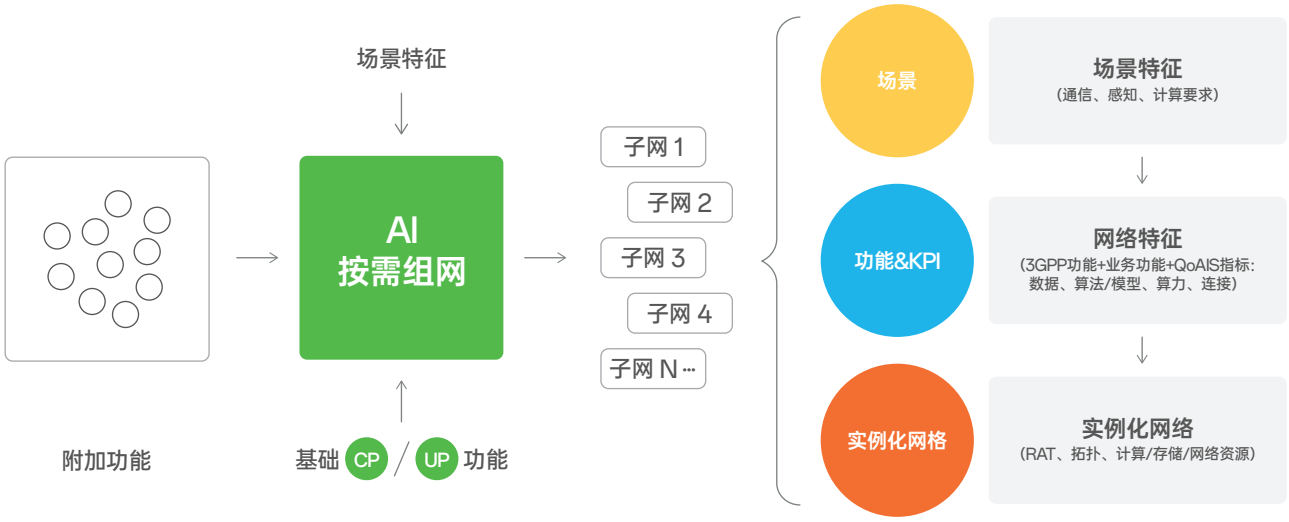


图 2-2： 基于极简核心内生智能的按需组网

2.1.3 基于 6G 内生智能的智能化替代

6G 部署场景比 5G 丰富得多，子系统数量也大幅增加，仅靠智能按需组网能力将现有的 CP/UP/AP 功能按照场景进行按需选择和组织，只能使 6G 网络复杂度不明显高于 5G。要想在 5G 基础上显著降低复杂度，必须依赖内生智能的另一个能力——智能化替代。

智能化替代即将相当一部分传统协议、传统算法替换为“黑箱化”的 AI 协议和 AI 算法。3GPP Rel-18 的 AI 相关研究项目的初步研究结果已经揭示出：各种 AI 应用例（use case）的标准化影响基本都是类似的，无非是要定义 AI 的生命周期管理（Life Cycle Management，LCM），包括 AI 数据采集、AI 模型的训练、部署、管理、传输、激活、选择、切换、配置及推理等。无论在哪个技术点上使用 AI 模型，相关协议无非是定义上述这些过程，虽然仍需定义不同的数据接口格式，但协议的差异性、特异性已经大幅降低。例如在 3GPP Rel-18“AI/ML for NR air interface”项目中，CSI 增强、波束管理、定位增强 3 个 use case 虽然需要定义不同的 AI 模型输入输出格式，但 AI 生命周期管理相关的协议是基本相同的，可以通用的。而在现有 5G 标准中，这三项技术的空口协议是截然不同的，且都是相当复杂。

本节主要介绍网络层协议的智能化替代，物理层技术的 AI 算法替代我们将在 3.3 节中介绍。

网络层智能化替代的目的，是在极简核心的 CP/UP 功能上，尽量少地定义新的 CP 和 UP 标准化功能，而是通过 AI 算法来替代标准化要求，以实现 6G 网络的轻量级协议。在深层次内生智能的 6G 极简核心中，AI 的智能优化可以帮助减少 CP 和 UP 面功能的数量和复杂度，这样原本所需的标准化定义的 CP 和 UP 功能就被大大减少，产品的开发复杂度和部署成本也可随之降低。

图 2-3 基于 AI-Cube 空间 [3] 描述，以 6G 感知（Sensing）举例，原本需要实现的标准化 CP 和 UP 功能较多，使用智能优化后，CP 和 UP 维度的功能可以被减少，取而代之的是智能维度的提升。

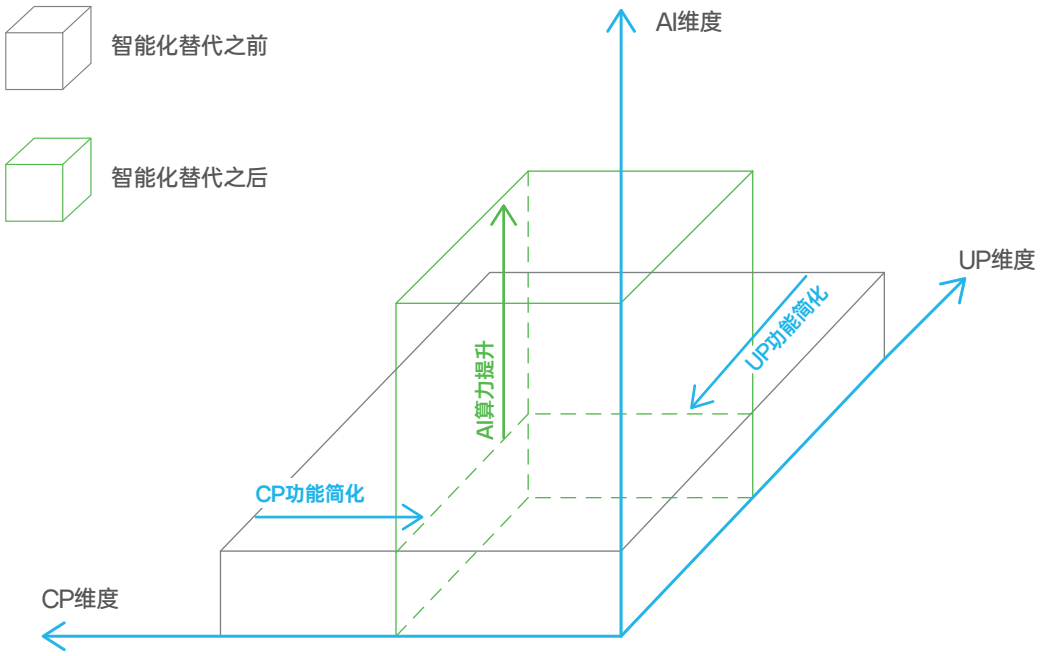


图 2-3： 基于极简核心智能优化的 Sensing 业务功能

具体而言，智能化替代包括决策类优化和非决策类优化两种方式。

决策类优化可以通过如下两类输入实现对CP功能的简化（如图2-4所示）：

- 第一大类输入是通用预测（包括业务预测、位置预测、负载预测和用户行为预测）。 每个具体的 CP 功能都可以使用一种或几种通用预测作为输入判决的重要依据，实现对 CP 功能的简化。 为了实现通用预测，需要收集和构建终端、网络和应用三方的数据集对 AI 模型进行训练。
- 第二大类输入是个性化数据。 AI 赋能不同功能时会有不同的个性化输入参数，比如对于切换场景，RSRP、测量事件配置等是其个性化的输入参数。 对于随机接入场景，小区干扰情况、历史随机接入数据等是其个性化输入参数。

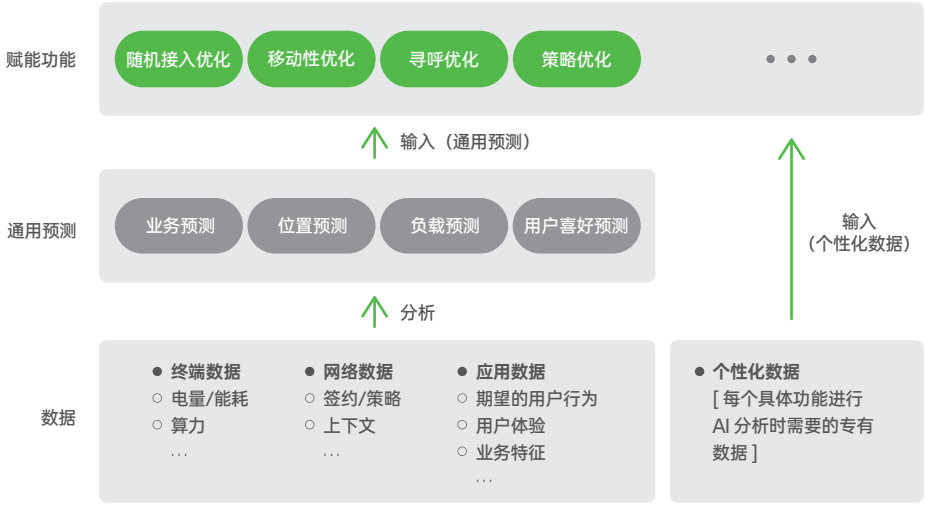


图 2-4： 通过智能替代实现 CP 功能的简化

非决策类优化可以用于UP功能的简化（如图2-5所示）。

AI 赋能的非决策类功能的具体形式，是将数据处理的部分或全部步骤替代为 AI 模型的推理过程。 针对每个 UP 功能，AI 模型可以通过对限制因素和期望效果进行个性化定义，实现最佳的数据处理。 通过 AI 赋能的方式，原本需要通过人为维护和迭代优化的数据处理过程，可以替换为 AI 算法的自学习和自演进过程，以实现对性能的不断优化。

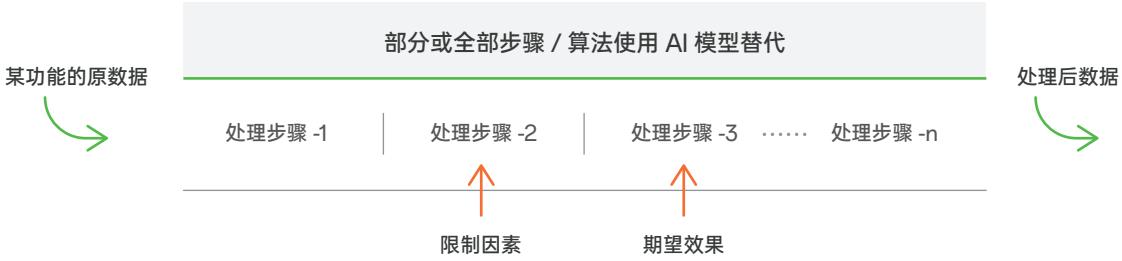


图 2-5： 通过智能替代实现 UP 功能的简化

6G 极简核心之安全 2.2

2.2.1 6G 时代的变化及安全趋势

6G 时代万物互联，业务、连接方式、接入设备呈多样化发展，如工业互联网、智能家居、智慧物流等业务，这些行业用户通常会使用专属设备、需要机器与机器之间的数据流、使用 Sidelink 连接方式，这些需求会对当前以人与人为主的通信模式带来巨大改变。

对于 6G 安全架构来说，发生的关键变化体现为以下两点：

- **安全信任模型由双向信任变为多方信任，需要建立多方信任模型与内生安全**
- **安全保护的业务数据由单一变为多元，需要建立多元的业务数据与智能安全**

多方信任模型与内生安全

3GPP 5G 安全标准 TS 33.501 [5] 定义了双向信任的安全架构，即 UE（User Equipment 用户设备）和运营商 HE（Home Environment 归属环境）双方共享用户根密钥，作为双向信任的安全可信根。当用户设备接入运营商网络使用网络资源的时候，用户和运营商网络根据用户根密钥执行双向认证。并且，用户和运营商网络各自根据用户根密钥进行密钥衍生计算，得到一系列保护密钥，对双向传输的信令和数据进行加密保护和完整性保护。

6G 时代，如工业互联网、智能家居、智慧物流等业务的行业用户通常会使用专属的终端设备，当这些设备接入运营商网络使用网络资源的时候，需要在接入设备、行业用户、运营商之间进行认证，因此至少需要在接入设备、行业用户、运营商之间建立三方信任模型。

当连接方式和业务模式继续变化，灵活组合，出现如 Sidelink 机器与机器连接、多业务相互协同、MEC 部署等情况，信任关系则基于接入设备、行业用户、运营商三方信任模型，进一步演变为包含多终端、多个行业用户、多个入网节点的多方信任模型。

包含多终端、多个行业用户、多个入网节点的多方信任模式需要的安全可信根不可能仅仅基于单一的用户根密钥，而需要根据设备、业务、网络的基础组件建立内生安全可信根。

多元的分布式业务数据与智能安全

6G 时代，人工智能的使用将成为主流趋势，数据资产成为数字化社会的关键生产要素，以工业互联网及智慧物流为代表的行业数字化业务将会产生大量数据，如零功耗、通感一体化为代表的新型终端和通信方式使得网络中承载的数据更多来源于分布式的终端设备。多元的工业数据需要高效的安全保护机制，分布式的多源的数据采集和汇聚方式使得双向传输保护不再适用，基于用户根密钥及衍生密钥的安全保护将会发生变化，需要更灵活和更智能的安全保护机制。

2.2.2 6G 时代
关键安全技术

区块链支持多方信任模式和分布式业务数据保护

区块链具有分布式和可信的特点，能够促进数据的共享，在 6G 时代将成为产业数字化的关键基础设施。 在产业应用中，电信运营商和区块链供应商大力发展区块链基础设施网络，并面向各行各业推出区块链服务，其中包括区块链身份管理服务、接入认证服务和安全服务。

区块链分为公有链、私有链、联盟链。 其中联盟链和私有链是可信区块链，联盟链可以由多方参与，通过安全算法实现参与方之间的信任关系，能够用于实现 6G 时代的多方信任模式，不依赖于第三方即可构建内生可信的多方信任可信根。 基于区块链的 DID（分布式数字身份) 技术，能够支持分布式的身份管理，可用于实现分布式认证。

零功耗设备这样的轻量级 IoT 终端受限于计算、存储资源，可能无法支持传统的认证计算，DID（分布式数字身份) 技术支持轻量级的身份管理和认证机制，可用于低成本认证。

物理层安全支持轻量级传输安全

物理层安全基于香农提出的完美安全性概念以及 Wyner 提出的窃听信道模型，建立传输信道的安全性，不需依赖于高层的协议及设备的加密计算。 零功耗设备受限于计算、存储资源，可能无法支持传统的安全保护，如基于 256 位密钥的加密机制，PDCP 协议层的安全处理。 物理层安全可以作为一个很好的补充，实现极简 IoT 设备的轻量级传输安全。

智能的安全策略

6G 引入新业务并非一蹴而就，面向用户的数据连接和面向工业互联网的数据连接都会为 6G 创造价值，零功耗 IoT 设备和 NB IoT 设备将长期共存，分布式的信任模式和分布式的认证机制并不能取代中心化的安全机制，轻量级传输安全是对极简 IoT 设备的一种补充安全机制。 面向 6G 多元的业务、多源的数据，安全策略必须是智能的、灵活的、动态的。

智能的安全策略可以从以下几个方面考虑：

- 智能的信任模型和认证机制。 运营商可拥有多种可信根，支持对应的认证机制，根据业务类型、终端类型、数据类型、接入技术类型、安全风险等级，选择不同的可信根及认证机制。 例如选择双方 / 三方可信根和 5G AKA 认证机制，或者选择可信区块链的多方可信根和证书认证机制。
- 智能的传输安全机制。 运营商可根据业务类型、终端类型、数据类型、接入技术类型、安全风险等级，选择不同的传输安全，或者他们的组合。

随着 6G 时代业务类型、终端类型、接入技术类型的不断丰富，为了高效的实现灵活的、动态的安全策略，必须引入智能化的安全策略管理机制。

2.2.3 6G 时代零信任安全架构

基于**多方信任模型与内生安全**这个关键变化，对传统安全信任域划分带来改变，传统的安全边界被打破，不再根据设备在网络中所处的位置来定义信任域。基于多元的业务数据与智能安全这个关键变化，同样的连接中传输的可能是不同的数据，传输安全保护的等级需要考虑数据本身的分类分级，传输安全由保护网络向保护数字化资产迁移。在 6G 时代需要对信任域、数据访问、以及传输安全进行更全面的安全评估，实施灵活的、动态的安全策略。

自从 2009 年 Forrester 提出零信任理念以来，零信任安全模型在金融、互联网、云服务等行业中得到广泛应用。零信任侧重于保护资源（资产、服务、工作流、网络帐户等），而不是网段[6]。基于零信任的安全系统设计可以通过动态的身份认证和授权，保证对数据和资源的访问由动态策略决定。

在 6G 时代，可以考虑基于零信任的安全架构，设计灵活的、动态的智能安全策略，以保证多方信任模型与内生安全以及多元的业务数据与智能安全。

6G 极简核心之 灵活频谱共享

2.3

在传统的通信系统中，高效的频谱管理一直是一个难题。

首先，对于频谱主管机构而言，频谱划分的目的是让通信技术更高效、快速的落地，同时又要满足频谱使用方的实际需求，并且还要保证较高的频谱利用率。 通常对于频谱使用者而言，频谱的使用需求并非在任意时刻或者不同地理区域都是均匀分布。 理想情况下，为了满足频谱的需求且保证高利用率，需要做到对于时间，地理位置的极致细化的划分。 但是这样将严重拉长频谱划分前的调研和准备工作，从而导致频谱划分的滞后。 因此传统的频谱划分无法做到细粒度划分，只能不分时间和地理位置，仅从频域维度将频谱分配给使用方，这样也是一个各种因素权衡后的结果。 除此之外，当频谱划分并拍卖后，对于频谱使用率的管理也是主管机构面临的一个挑战，为了有效的获取频谱使用的情况，主管机构需要在不同的时间地点对于频谱的使用情况做监测和统计，这样也增加了管理成本。

其次，对于频谱使用方来说，不同国家的频谱使用成本各异。 但总体来说，使用方首先需要付出高额的频谱租用费用，但是商用布署无法快速达到全地域全面覆盖，因此在部署没有达到成熟阶段之前，频谱的利用率并不理想，导致投资收益率较低。

传统频谱分配痛点	灵活频谱共享的目标	灵活频谱共享的实施
• 分配周期长，前期准备长 • 主管机构对于频谱管理成本高 • 频谱分配静态，利用率低	• 降低频谱划分工作量 • 提供更可靠的频谱价值信息 • 降低频谱持有成本 • 提高频谱利用率	• 主管机构，运营商，垂直行业联合建立联盟链 • 通过区块链实现频谱灵活共享 • 记录交易、频谱使用信息

因此，简化的频谱分配和管理也是 6G 极简核心一个重要功能，这里极简的含义，一方面是要大幅的简化频谱分配和管理的流程，另一方面是要提高频谱的利用率。

6G 灵活频谱分配的核心，是借助区块链技术来实现频谱的灵活共享。

一个简单的描述是频谱拥有者可以把频谱的使用权转让出，频谱使用权的转让可以细化到时间、地理位置的维度，获得频谱使用权的一方可以在此频谱中通信，同时频谱拥有者也可以从中获得收益，从而通过频谱共享达到按需动态分配频谱的目的。

采用灵活频谱分配，主管机构可以进行相对简化、粗粒度的初始频谱划分，而更细化的划分交给后续的频谱共享机制来完成，而频谱拥有者可将使用权按时间、频谱、地理位置三个维度进行划分、转让。 例如，频谱拥有者可以根据自身的情况，决定对于某段频谱在特定时间内，在特定地理位置下的使用权进行转让，如图 2-6。

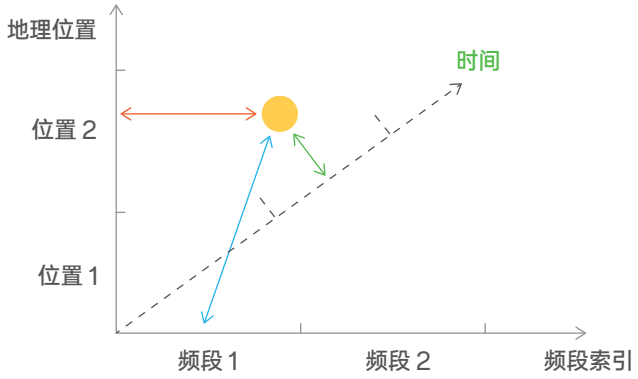


图 2-6： 时间、频谱、地理位置三维频谱使用权划分

首先需要建立一个区块链基础设施，在基础设施上可以建立一个联盟链，联盟可以由频谱主管机构，传统运营商，垂直行业运营商组成。 他们也同时是联盟链上的节点，当频谱拥有者发布一个智能合约来触发频谱的共享。 使用权的转让可以通过竞价形式，或者是非竞价形式，对于后者可能存在同一个频谱中有多个使用者的情况，因此在这个场景中需要考虑到干扰规避传输技术。 当交易完成后，节点会把交易记录和使用权记录打包成区块并连接到链上， 这样区块链上的各个全节点都可以保存最新的使用权更新数据，整个的数据结构如图 2-7 所示。

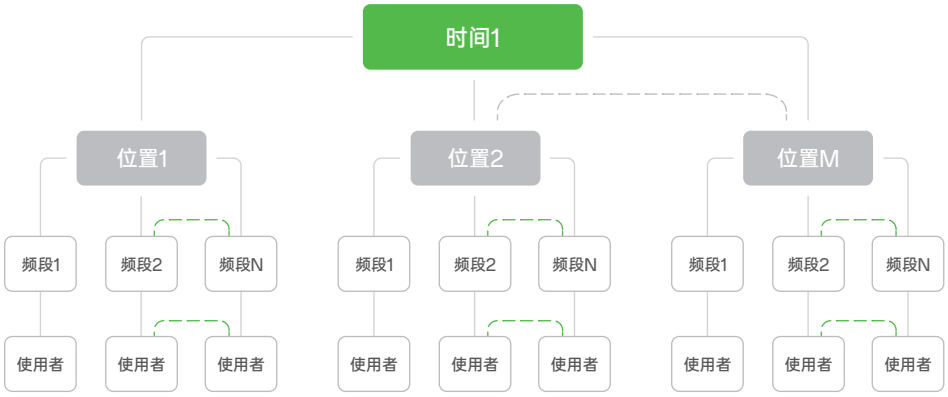


图 2-7： 区块链频谱共享数据结构

基于区块链的频谱共享的另一个优点是，主管机构可以实时的掌握真实不可被篡改的频谱交易记录，可以获取更为真实的频谱的实际市场估值，以及频谱的利用率。 另一方面，频谱使用者可以通过区块链来记录更细节化的频谱使用信息，这样主管机构可以更方便的获得频谱的使用情况，从而大幅减少频谱管理的成本。

3.0 6G宽带蜂窝子系统

- 6G宽带蜂窝KPI指标要求
- 6G宽带蜂窝关键技术与系统设计
- 6G空口的AI化替代

6G 宽带蜂窝 KPI 指标要求

3.1

宽带蜂窝模式是 4G、5G 系统的传统核心，在 6G 系统中仍是最重要的子系统之一。 同时，宽带蜂窝也是 4G、5G 系统中技术最成熟、用户满意度最高的应用模式。 4G、5G 手机业务快速普及，有力支撑了各种移动互联网应用的蓬勃发展，证明了 4G、5G 在满足手机用户的多媒体音视频感受方面获得了良好的效果。 6G 宽带蜂窝技术主要目标，并不是使能一个新业务，而是传统业务的性能提升和应用范围扩展，主要包括：

- **高分辨率视频流的普及；**
- **XR 业务的普及；**
- **AI 模型的分布式推理、传输与训练。**

我们认为，6G 宽带蜂窝子系统应满足如图 3-1 所示。

首先，5G 系统理论上的峰值数据率 20Gbit/s 已经可以支持高清视频、XR 媒体流甚至 AI 模型和数据在广域覆盖环境中的传输，因此 6G 宽带蜂窝子系统的峰值速率不需要追求明显高于 5G 的峰值数据率。

其次，由于 5G 高阶 MIMO 传输和毫米波传输的覆盖率有限，在 5G 宏小区边缘实现 100Mbit/s 的用户感受数据率仍然存在挑战，6G 应致力于切实保证这一速率成为随时随地可得的用户感受，追求理论上的更高数据率并不是首要目标。

接下来，由于空天通信和地面蜂窝系统的信道传输环境、软硬件能力存在很大的差别，6G 宽带蜂窝子系统应集中定义地面蜂窝传输技术，首先致力于在经常有人居住的地区提高覆盖深度，海洋、荒漠等人员稀薄地区的覆盖应由 6G 空天通信子系统实现。

最后，6G 宽带蜂窝子系统仍应侧重于通信能力，具备基本的定位和感知能力即可，不应过度追求超高精度的定位和感知性能，造成系统、终端的复杂度和成本大幅提升。 这一能力定位对于绝大多数宽带多媒体和 AI 业务是足够的，少量确需高精度定位、感知的应用场景，可以通过在网络和终端集成 6G 定位与感知子系统来提供业务。

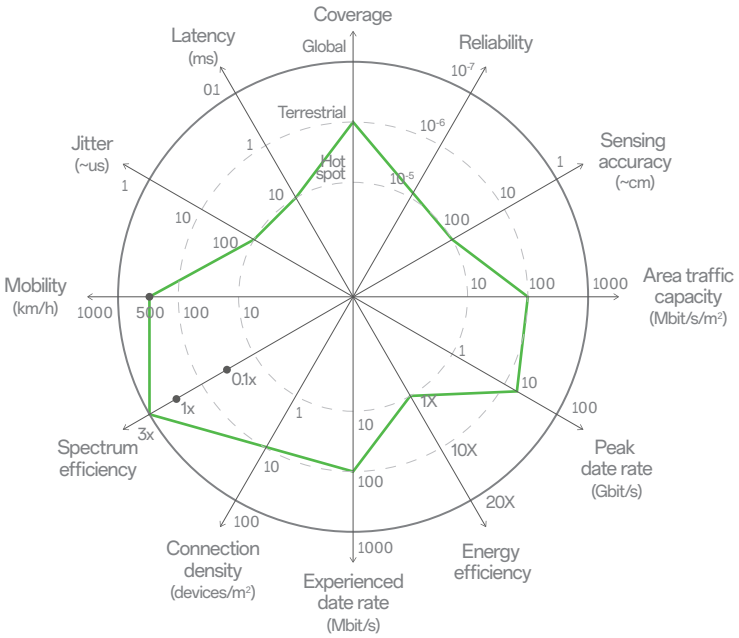


图 3-1： 6G 宽带蜂窝子系统 KPI 要求

6G 宽带蜂窝关键技术与系统设计

3.2

面向上述 6G 宽带蜂窝子系统 KPI 指标，我们对各项 6G 潜在关键技术的观察如下表。

技术分类	采用该技术的目的	关键技术	6G 应用前景
高频新空口技术	实现更大传输带宽和更高峰值速率	用于高频毫米波的新波形	相对成熟，6G 应用可能性较高，但仍需解决视距传输覆盖率低的问题。
		太赫兹传输	传输距离短，更适合 D2D 传输
		无线光通信	传输距离短，更适合 D2D 传输
频谱效率提升技术	获得更高的频谱效率	基于AI的空口增强	相对成熟，6G 应用可能性很高，性能增益大小有待于进一步研究。
		超大规模天线	相对成熟，6G 应用可能性较高，但仍需解决应用场景狭窄 / 耗能高的问题
		新型多址	取决于是否获得足够大的性能增益、是否能就技术方案达成共识。
		全双工	灵活双工模式相对成熟，6G 应用可能性较高。 全双工成熟度挑战较大，实际性能增益有待验证。
覆盖增强技术	解决高频段视距传输覆盖率低的问题	智能表面（RIS）	相对成熟，6G 应用可能性较高，但仍需验证实际性能增益，并解决部署成本的问题。
可靠性提升技术	实现更高传输可靠性（如 10^{-7} 或更高）	新型信道编码	仍在研究中，实际性能增益有待验证。

表 3-1： 6G 宽带蜂窝潜在关键技术

根据对 6G 性能的贡献，这些技术可以分为四大类：

高频新空口技术

这类技术的目标是实现比 5G 更大的传输带宽和更高峰值速率，由于获取更大带宽的主要方式是在高频段寻找新的频谱，这类技术主要是高频段传输技术。

其中频率较低的毫米波传输技术已经在 5G-Advanced 阶段进行了研究，结论是可以重用中低频 5G 的 OFDM 技术。 但高频毫米波信号的传输特性将发生较大变化，可能需要考虑不同于传统 CP-OFDM 的新波形技术。

更高频段的太赫兹（THz）和无线光通信技术虽然可能实现更大带宽和更高速率的传输，但其传输距离过短，用于蜂窝组网需要极高的基站密度，部署难度很大。 我们认为太赫兹和无线光通信更适合用于 6G D2D 子系统，将在 4.2 节中介绍。 当然，这两种技术还有可能作为感知技术用于 6G 定位感知子系统。

频谱效率提升技术

从 2G 开始，频谱效率提升是历代移动通信技术长期追求的目标。理论上讲，频谱效率的提升总是可以换取更高的数据率和系统性能。但实际上，提高频谱效率当然不是没有代价的，其几乎必然要付出更高的设备复杂度和部署成本。

以多天线（MIMO）技术为例，在 HSPA+ 和 4G 系统中开始引入 MIMO 技术时，只采用 2~4 个天线端口就能实现大幅度的频谱效率增益，采用 MIMO 技术的“投入产出比”很高。在 5G 中采用大规模天线技术，可以实现多用户 MIMO（MU-MIMO）和垂直方向的分层覆盖，从理论上是很有吸引力的技术。但 MU-MIMO 和 3D MIMO 并不是在所有部署场景都能获得明显的性能增益，大量天线带来的成本和能耗提升并不总能换取相应的性能提升。

新型多址技术是另一种在 5G 阶段深入研究过的关键技术，但由于候选技术方案过多、性能增益和复杂度评估没有明确结论，没有被 5G 标准采纳。预计 6G 标准化阶段会对新型多址技术再次进行研究，但仍然会面临 5G 时类似的挑战，新型多址技术往往也是在某些特定的场景能够获得比较明显的增益，产业是否能对这些“优势场景”及其性能增益获得共识，仍然是一个问号。

作为全双工的初步阶段，3GPP Rel-18 开始对灵活双工技术开展研究，这种技术虽然不能实现完全的“全双工”效果，但其实现复杂度相对较低，沿这个技术路线完全有可能成为 6G 标准的一部分。完整版本的全双工技术还在深入研究中，如何控制设备复杂度还面临一定挑战。

物理层 AI 是在 3GPP Rel-18 中研究的另一项“准 6G”技术，虽然还没有完成性能增益的评估，但是已经基本可以确定是 6G 的核心技术之一。究其原因，不仅因为 AI 可能实现一定的性能增益，还因为它可能实现大幅简化的空口协议，并实现与业务层的 AI 算法共享训练和推理算力，使 6G 设备和终端的应用处理和基带处理有望统一到一个软硬件架构中。6G AI 对物理层算法的替代，将在 3.3 节中进一步介绍。

覆盖增强技术

在 5G 阶段，3GPP 也对一些覆盖增强技术进行研究和标准化，包括中继技术和信道设计的各种优化等。智能表面（RIS）是一种针对性的解决毫米波视距传输覆盖率低的覆盖增强技术，如果能显著提升毫米波信号的覆盖范围，将比引入更高频段的 THz、无线光通信等只能用于热点覆盖的“峰值增强技术”，对 6G 的意义更大。但业界仍需深入验证 RIS 实际性能增益，并解决 RIS 站点的部署成本问题。

可靠性提升技术

5G 标准引入 LDPC 和 Polar 编码，分别为 eMBB 高速率传输和 URLLC 高可靠性做出了贡献。是否需要引入新的信道编码，以实现更高的传输可靠性，学术界还在深入研究。不过如 3.1 节所述，6G 宽带蜂窝子系统不需要进一步提高传输可靠性，如果引入新的信道编码，其主要应用场景适用于 6G URLLC 子系统。在 5G 系统中，eMBB 和 URLLC 都是共用一套信道编码技术。但在 6G 系统中，如果新的编码技术具有相对高的复杂度，也可以考虑仅在 6G URLLC 子系统中采用。

由于 4G MBB 和 5G eMBB 技术已经相当成熟，也在市场上广泛验证了其应用效果，在 6G 沿用 5G 核心物理层技术（OFDM+MIMO）的条件下，6G 宽带蜂窝子系统可以大量沿用 5G eMBB 的成熟设计，包括信道结构、资源分配、接入等物理过程。但是在此之上，6G 宽带蜂窝子系统还可以引入 AI 算法，与传统算法并行使用。如 2.1.3 接所述，使用 AI 算法的 6G 系统可能采用明显不同的以“描述 AI 模型生命周期管理”为基础的系统设计。也就是说 6G 宽带蜂窝子系统可能会包含两种空口系统设计。

6G 空口的 AI 化替代

3.3

智能化的网络构建已经成为未来移动通信系统设计的重要方向。3GPP Rel-18 已经初步开展用于 5G 空口的 AI 增强技术研究，涉及信道状态信息（CSI）反馈增强、波束管理、定位增强 3 个 use case。但是在这 3 个 use case 引入 AI 增强仍是在传统的收发信机架构中，试图在零散的物理层技术点上用 AI 算法替换传统算法，即便在这些技术点上获得了一定增益，对 6G 系统整体的性能提升也贡献有限。

因此，在当前针对 6G 系统的空口 AI 化演进的过程中，有必要对研究的路线、所受的限制条件、基础问题，以及期待的突破与改变做出较为客观和明确的判断，并相应构建短、中、长期演进规划，以在不同层面和维度上获得理论与工程上的增益与突破。

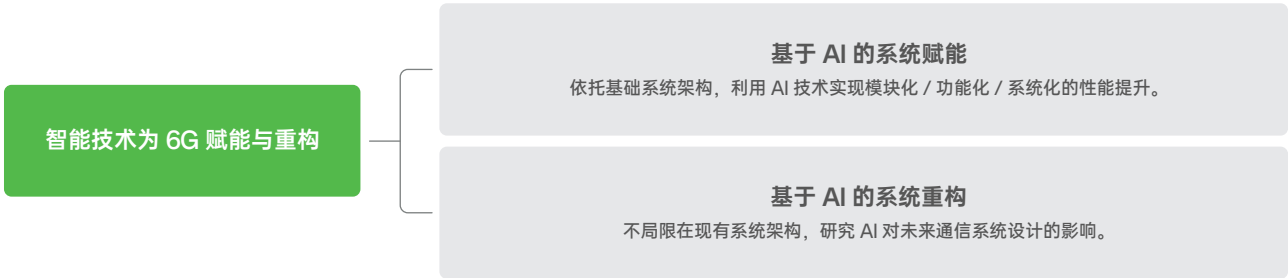


图 3-2： 智能技术为 6G 赋能与重构

6G 空口的 AI 化替代包括基于 AI 的系统赋能和基于 AI 的系统重构两个层面

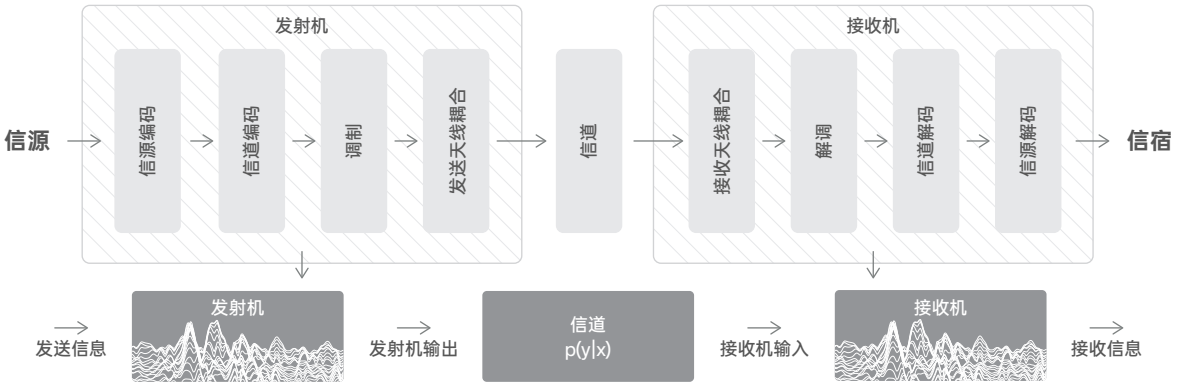
如图 3.2 所示，针对无线通信系统的智慧赋能将依托 AI 技术首先提升单点或者特定链路上的无线通信系统性能，即利用 AI 对原有系统架构中的功能模块进行数据驱动或者模型驱动的智能化增强。例如，在物理层对原有的信道估计功能、信道状态信息反馈模块、波束管理功能、符号检测链路、定位子系统等进行利用 AI 技术的增强设计，提升相应模块的性能；在接入网对系统中的移动性管理、资源分配、负载均衡、网络 / 用户节能等问题，利用 AI 的决策优势和预测优势，提升接入网络整体性能增益；在核心网侧，构建支持 AI 的网络结构，实现基于 AI 的网络规划与细化优化，并实现基于 AI 的网络故障检测与维护能力。

上述面向空口 AI 化的功能应用是无线通信与 AI 技术结合的开端，但需要注意的是，6G 阶段的一个重要的背景特征是整个通信行业再次获得了系统性改变整体通信架构的机会。所以，在这个阶段，局限在现有架构设计的基础上做基于 AI 的系统优化并不是智能化 6G 研究的全部内容。着眼于 AI 对未来通信系统设计与重构的深度影响，一些固有的模式需要被尝试打破，开展全新的探索，以期构建形成面向智能需求且构建于智能技术上的新一代无线通信系统。**6G 空口 AI 化的研究将不只在已成型的具体无线用例上做修补优化型演进，而是从系统重构的角度出发，开展无线 AI 共性基础问题的深度剖析，包括：**

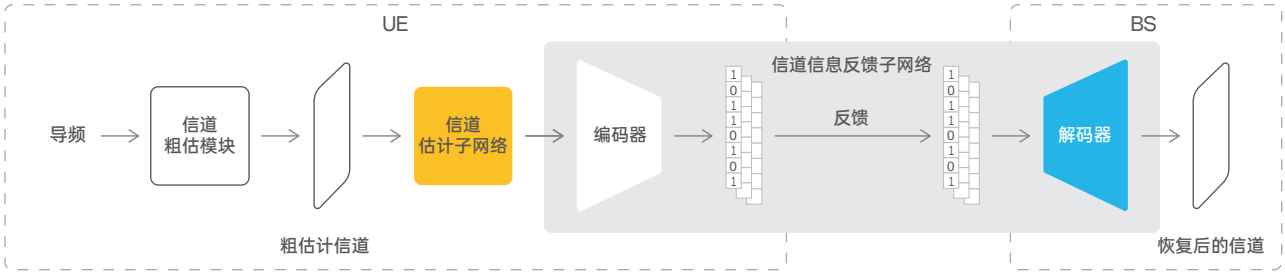
- **未来无线通信系统的一体化、系统化 AI 设计研究；**
- **针对小样本、场景自适应、可在线更新需求的无线 AI 解决方案分析；**
- **以智能信道建模与虚拟重构为代表的无线 AI 数据集构建等问题。**

1. 未来无线通信系统的一体化、系统化 AI 设计研究

首先，未来无线通信系统的一体化、系统化 AI 设计可包括自上而下的一体化设计和自下而上的系统化集成两个方向，如图 3-3 所示。传统的通信系统设计中，基于功能划分等原因，整体通信系统一直以来被划分为特定模块单元，通过问题拆解、模型化、参数化拟合等方法级联形成完整的通信系统设计。但是，通信的目的是有效信息的成功传输，人为划分的模块化设计只是实现达到上述目的一种方法，AI 技术则为上述问题提供了另一条思路。基于 AI 的整体通信系统设计，可以采用以传输增益最大化为目标，以待传输信息作为收、发模型的期待输入输出条件，以信道环境、噪声等不可控因素作为传输和模型构建的限制条件，以期获得整体的设计增益。与此同时，有必要指出大规模系统的一体化设计虽然在减少信息量损失的角度来看是有益的，但也会相应引入极高的自由度和复杂度问题，对于无损信息量中有用信息的提取在短时间内依旧是对 6G 系统 AI 化的挑战。所以基于模块化 AI 的集成与融合，也是未来无线通信系统智能化演进的重要探索阶段。



（a）一体化 AI 设计与重构



（b）模块化 AI 集成与融合

图 3-3： 一体化、系统化 AI 设计的两种思路

2. 针对小样本、场景自适应、可在线更新需求的无线 AI 解决方案分析

其次，对于智能化的 6G 无线通信系统来说，还需要对无线通信问题与 AI 技术深度融合所需面对的共性限制条件形成明确的判断。自 5G 研究与商用的后半程开始，无线系统 AI 化的研究重点集中在了期望通过增益、复杂度、泛化性以及其他多个维度优先评估无线通信系统与人工智能技术结合后对未来无线通信系统带来的新变化，继而触发更多针对性的研究与工作。在上述阶段，相对理想的数据、训练、场景等限制条件被优先考虑，以快速确认 AI 解决方案在无线系统中使用所带来的影响。但上述的假设往往会引入一些过于理想的条件假设，比如，对于数据来说，是否能够获取足量的训练数据，以及获取数据所需要付出的代价如何评估；对于场景来说，是否模型训练可以在足量场景下完成，以及不同场景对于智能无线通信解决方案的影响如何评估；

此外，对于模型、算法训练来说，在不同场景、数据条件下是否都可通过离线处理的方案来解决也是不确定的。 对于 6G 系统智能重构来说，需要充分考虑实际系统与人工智能技术深度结合时所面临的上述数据、场景、以及在线训练更新等更多方面的影响因素，从系统设计的源头支持面向小样本、场景自适应、可在线更新需求的无线 AI 解决方案（例如，元学习、迁移学习等，如图 3-4 所示）的应用部署，进一步构建和扩充未来无线通信系统的智能化边际。

图 3-4： 基于元学习的小样本条件场景化适配示意

3. 以智能信道建模与虚拟重构为代表的无线 AI 数据集构建等问题

此外，AI 和下一代无线通信系统的深度结合过程中，作为智能化系统设计、性能评估的基础，针对无线数据集本身以及衍生问题的研究在 6G 阶段中将扮演着不可或缺的角色。 以物理层应用为例，无线数据大多都可溯源到信道数据。 作为基础方案，可采用平台仿真与外场实采形成基本的物理层无线 AI 研究数据集。 但是，对于实际无线环境来说，通信系统所需面临的信道条件往往极度复杂，仿真数据、以及局部实采数据对于方案论证的可靠性往往有限。 在实际无线环境中，充分且完备的实采信道数据很难获取。 通过传统路测的方式获得底层无线信道数据来支撑基于 AI 的无线通信研究时，往往在花费极大的人力、物力成本后依旧很难获取到期望的完备数据集作为无线 AI 解决方案的有效训练数据。 针对这类问题，在 6G 无线系统的 AI 化构建中需要充分考虑无线 AI 不同研究方向下所涉及的数据集需求，充分评估获取的方式与潜在的获取难度，并支持在小样本数据假设下依托少量真实样本的假设完成真实数据建模，例如通过智能技术实现物理信道的虚拟重构，如图 3-5 所示，继而评估不同来源的无线 AI 数据集在其所对应的相关无线 AI 用例中的可用性及有效性。

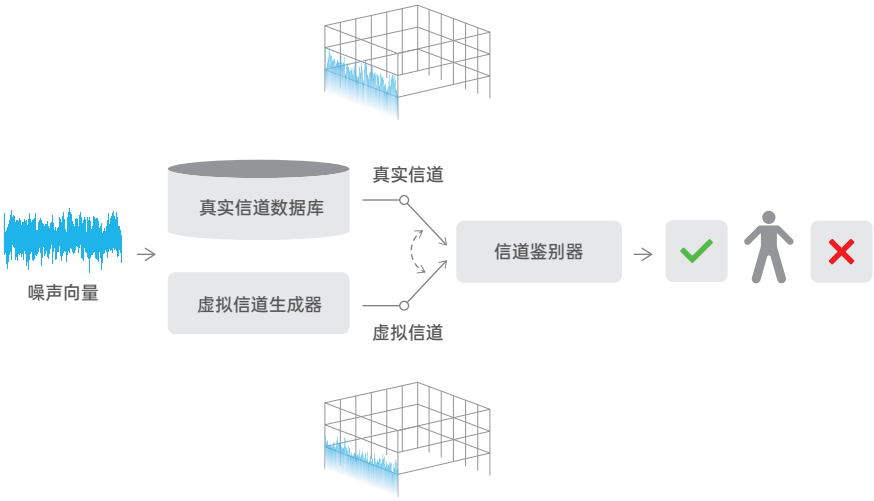


图 3-5： 基于 AI 的小样本条件信道建模与虚拟信道重构

人工智能的发展与应用为未来无线通信系统的智能构建提供了潜力，也带来了更多的挑战。 对于 6G 来说，未来的无线通信网络将不再是一张简单的传输网络，智能的需求、智能的改变、智能的构建将贯穿于 6G 系统甚至更长久系统的设计与建设当中，我们期待着“智启无线、智享世界”的到来。

4.0 6G D2D 子系统

- 6G D2D KPI 指标要求
- 6G D2D 关键技术与系统设计
- 基于 AI 的 D2D 系统设计
- 太赫兹技术
- 可见光通信

6G D2D KPI 指标要求

4.1

6G D2D 子系统的 KPI 指标可以通过下图所示。

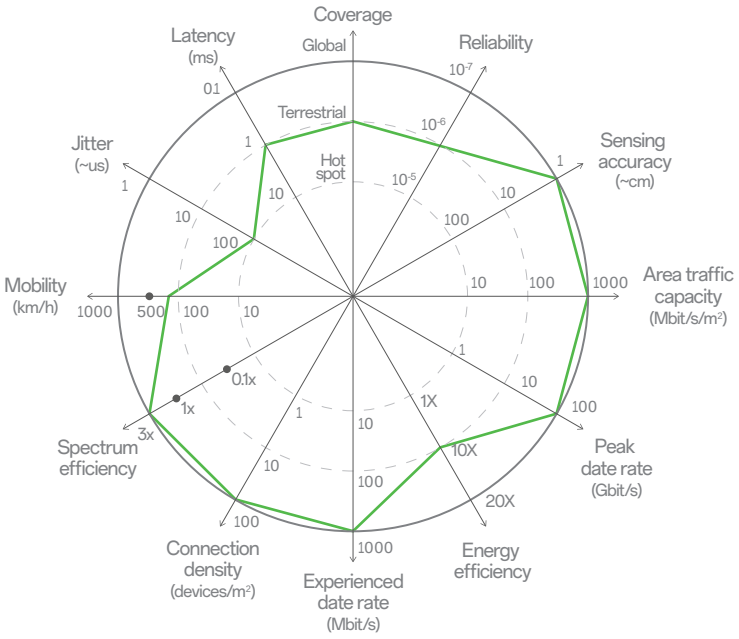


图 4-1： 6G D2D 子系统 KPI 指标

峰值速率和数据率

6G 系统考虑采用更高通信频段的传输技术，如太赫兹通信和无线光通信，这些高频段具有很大带宽，可以提供高传输速率。 但其传输距离过短，用于蜂窝组网需要极高的基站密度，部署难度很大。 太赫兹和无线光通信更适合用于 6G D2D 子系统，在几米甚至更短的距离上进行终端间的直接数据传输。 因此 6G D2D 子系统的峰值速率和用户数据率可能会超过 6G 宽带蜂窝子系统。 也就是说，6G 系统的最高峰值速率和用户数据率可能是通过 D2D 子系统来实现的。

连接密度

由于消费电子设备之间的 D2D 通信可能在很短距离内进行，使 D2D 子系统可以实现很高的连接密度，支持很高的用户连接数量，6G D2D 子系统的连接密度也完全可能超过 6G 宽带蜂窝子系统。

移动性

D2D 通信的主要应用场景仍然是个人设备之间的互联和车 - 车互联，因此其移动速度在 150km/h 以下即可满足要求，支持过高移动速度可能提高 D2D 子系统的复杂度和成本。

定位精度

由于 D2D 感知主要用于相邻终端之间的精确定位，定位距离较短，视距连接比例很高，更有利于实现很高的定位精度。 因此 6G D2D 子系统的感知精度可望达到 cm 级别，这种高精度定位对邻近终端之间的高精度互动业务（如交互式 XR 游戏、协同驾驶）也是必要的。

6G D2D 关键技术与系统设计

4.2

随着 6G 系统中可用频段越来越高，通过基站实现无缝覆盖变得越来越困难，利用 D2D 技术实现终端到终端之间的直接通信会成为 6G 系统中越来越重要的通信方式。另外，D2D 技术可以和其他技术相结合，如基于侧行链路的定位技术、感知技术、大规模 IoT 技术、人工智能等，因此，D2D 技术将成为 6G 系统中最重要的技术之一。

4.2.1 基于 AI 的 D2D 系统设计

目前，人工智能在计算机视觉和自然语言处理等领域有着广泛的应用，在通信领域引入 AI 已经成为 6G 的研究热点。在 D2D 系统中可以考虑为 AI 技术引入如下新切入点：

- **基于 AI 的资源分配和功率控制**
- **基于 AI 对业务和负载进行预测**
- **基于 AI 的 Mesh 组网**

---

1. 基于 AI 的资源分配和功率控制

3GPP 已经展开侧行链路（Sidelink，SL）的研究和标准化工作，用于支持 D2D 系统通信。首先，sidelink 的资源分配可以分成两种模式，即模式 1 和模式 2。在模式 1 中，终端的传输资源是由基站分配的。基站可以为终端动态调度资源，也可以为终端配置侧行配置授权（Sidelink Configured Grant，SL CG）资源。在模式 2 中，终端自主从网络配置或预配置的资源池中选择传输资源。在 R16 版本的标准中，支持基于完全侦听（Full Sensing）的资源选择方式，进一步地，在 R17 版本中又标准化了基于部分侦听（Partial Sensing）和随机选取的资源选择方式。在模式 2 中，由于各个终端独立地确定各自使用的资源，这种分布式的模式对于引入机器学习的算法特别是引入强化学习的算法有天然的优势，并且这种基于强化学习的资源分配方式在学术界已经有了一定数量的研究成果。

强化学习是机器学习的一个重要分支，用于解决终端在与环境的交互过程中通过学习策略从而达成回报最大化等问题。换句话说，强化学习不需要事先给定训练集，而是通过执行动作获得环境对动作的奖励，不断地更新模型直至收敛。

依据是否沿用 3GPP 规定的模式 2 资源选择算法，可以将基于强化学习的资源分配大体分成以下两个方向：

- 在模式 2 资源选择算法，即资源预留与资源选择的基础上，针对其中的一些参数，引入强化学习确定其最优值。例如，文献 [7] 中针对 V2V 中资源排除时使用的 RSRP 门限值使用 Q learning 进行优化，以平均包接收率（Packet Reception Ratio，PRR）设计回报函数，确定最优的 RSRP 门限值。又例如，文献 [8] 中以碰撞概率和时延作为回报，调整半静态传输中计数器的值以及计数器减为 0 后的重选概率，使得终端采用匹配传输业务或负载的半静态策略。因此，沿用这一思想，对于资源选择或排除其他步骤中参数，都可以尝试通过强化学习进行优化。
- 另外一个可能的方向是，打破现有的资源预留与资源选择的机制，各个终端直接通过环境的感知，例如通过 CSI 以及干扰的测量，利用强化学习的方式确定最优的传输资源，最大化系统的吞吐量和可靠性等指标 [9][10]。但该方向相对于第一种方式对于传统的从 R14 以来一直使用的资源预留与资源排除机制破坏性较大。

2. 基于 AI 对业务和负载进行预测

预测也是人工智能或者说机器学习的一个重要分支。所谓预测，就是根据已有的训练集进行模型的训练，利用训练好的模型对于未知的数据，给出尽量正确的答案。预测可以是分类也可以是回归，例如如果预测业务是否会到达，则属于分类问题，如果预测业务的到达时间，则属于回归问题。在侧行链路中，对于业务或负载的预测可以应用于以下方面：

- **基于业务或负载的预测进行信道接入**
- **基于业务或负载的预测进行资源分配**
- **基于业务或负载的预测进行拥塞控制**

首先，基于对业务或负载的预测可以用于非授权频谱上的信道接入。非授权频谱是国家和地区划分的可用于无线电设备通信的频谱，该频谱通常被认为是共享频谱，因此当通信设备在非授权频谱上传输前需要进行先听后说 (Listen Before Talk，LBT)，LBT 成功后再传输数据。也就是说，当某一终端在非授权频谱上进行传输时，很可能导致另一终端 LBT 不成功而无法接入信道。如果终端能够预测出其他终端的业务，就可以提前获知频谱占用情况，从而避免上述 LBT 不成功的情况。在该情况下，可以使各个终端信道接入的时机尽可能地协调开，降低 LBT 的影响，使得通信传输达到与授权频段类似的效果。

其次，在上文中提到，目前终端自主进行资源选择是基于资源预留的，即当其他终端通过侧行控制信息预留了某一资源时，进行资源选择的终端将排除该资源，从而避免资源碰撞。但其他终端预留了资源并不表示该终端一定会使用该资源。因此，目前的机制可能会导致预留的资源未被任何终端使用。通过将资源预留和业务预测相结合，可以解决上述问题，使得一些被预留的资源也可以被使用，进而提高频谱效率。进一步地，业务的预测也可以替代资源预留，从而节省传输资源预留信息的信令开销。此外，从进行资源预留的终端的角度描述，如果进行资源预留的终端可以预测出即将通过侧行控制信息 (Sidelink Control Information，SCI) 预留的资源上是否会传输业务，当不进行业务传输时，则不进行资源预留，也可以使相应的资源被其他终端使用，提升资源利用率。

此外，业务预测也可以应用于拥塞控制。例如在现有侧行链路机制中，信道占用率 (Channel Occupancy Ratio，CR) 是用于支持拥塞控制的基本测量量。CR 的定义为：终端在 [n-a, n-1] 范围内已经用于发送的子信道个数和 [n, n+b] 范围内已获得的侧行授权包含的子信道个数占 [n-a, n+b] 范围内属于资源池的子信道总数的比例。根据测量的 CR 与信道占用率门限 (CRlimit) 进行比较，如果超过 CRlimit 则放弃相应传输。从 CR 的定义可以看到，目前计算 CR 是按照 [n, n+b] 范围内已获得的侧行授权包含的子信道个数，但是实际上 [n, n+b] 范围内已获得的侧行授权包含的子信道并不一定均会被终端使用。因此，结合业务的预测，预测 [n, n+b] 范围内会被使用的资源数目，有利于提升拥塞控制中测量量计算的准确性。

3. 基于 AI 的 Mesh 组网

未来世界将存在种类非常丰富的智能终端设备，例如日常生活中经常使用的智能手机、可穿戴设备、智能汽车，例如构建智慧医疗、智慧工厂、智慧家庭、智慧交通等各个垂直行业所需的智能设备，同时，XR 设备和机器人也有望在 6G 时代大放异彩，甚至未来可能出现全新设计的人机交互产品。 不同类型设备之间如果存在边界而导致无法互相连接，便无法带来更加智能化的用户体验，6G 将实现各类智能终端群的互联互通，构建“万物互联”的移动世界。

但是，当终端设备的种类和数量迎来爆发式增长，也将对通信质量和网络性能带来全新挑战，仅依靠基站集中调度的蜂窝网络可能不足以支撑各类智能设备互联互通的需求，6G 有望超越 5G，由蜂窝网络拓展到多样化的网络拓扑结构，以部署更加广泛的应用场景。 Mesh 网络是一种网状拓扑结构，不同于中心辐射式的蜂窝网络，Mesh 网络中没有中心控制端，终端设备以多跳互联的方式形成自组织网络，网络中任何两个设备均可以保持无线互联，这样的网络适用于智慧家庭、工业物联网、紧急救援等许多场景。 Mesh 网络对于底层物理通信技术不做限制，D2D 直连通信显然可以为 Mesh 组网提供便捷通道。

在 Mesh 组网关键技术的研究中，涉及到方向包括网络发现、路由转发和网络维护。 网络发现即用于终端节点发现并加入已有的 Mesh 网络。 Mesh 网络中的终端设备通过单跳或多跳的方式互相通信，因此路由路径的设计算法将直接决定网络性能，如何选择路径和中继节点需要衡量多种性能指标从而实现最优拓扑结构。 在稳定的 Mesh 网络中，可能遇到已有节点故障或离开等突发情况，Mesh 网络的一个重要优势则在于不会因为某一个节点的故障而导致其余节点之间的通信失效，这正是因为 Mesh 网络可以实时更新网络路由链表，维持网络稳定。 未来智能终端可能同时处于物理与虚拟的“融合”世界，所处的周边环境将会更为复杂，同时自身可能处在高速移动状态，因此，Mesh 网络中的智能设备既需要快速加入网络建立通信连接，也需要快速应对动态环境的变化做出决策，更新并维护网络拓扑结构，从而保持高效稳定的运行状态，但是目前智能终端可能无法支持如此强大的预测和决策能力。 6G 时代，AI 可以赋能 D2D 系统，智能终端作为边缘云计算和分布式 AI 计算的天然载体，以智能终端为中心，发挥 AI 强大算力解决 Mesh 组网中的关键技术，助力 Mesh 网络部署于广泛的应用场景。

4.2.2 太赫兹技术

4.2.2.1 太赫兹技术的特点

6G 网络中涌现了很多新兴应用，如沉浸式远程存在、全息技术、连接机器人和自主系统、扩展现实（eXtended Reality, XR）和数字孪生等，这些带宽密集型应用与 5G 系统相比，至少需要增加 1000 倍的容量，并且这些应用还需要多用途的无线功能，包括通信、传感、定位和控制，因此需要向更高频率的太赫兹频段进行迁移。太赫兹频段在 0.1Thz-10THz（1Thz=10^{12} Hz），介于微波和红外线之间，频带资源丰富，之前由于半导体发展技术的限制，没有有效的收发器和天线，太赫兹通信技术没有得到应用，但由于等离子体器件和石墨烯设计的最新进展，太赫兹通信技术已成为 6G 网络中的研究热点。

太赫兹频段具有以下特点： 1. 数据传输速率高，频带资源丰富，可以为 6G D2D 系统提供高传输速率； 2. 高路径损耗和反射损耗； 3. 视距链路易被阻塞； 4. 分子吸收性，尽管分子吸收性会阻碍太赫兹波段的通信，但这一特性显著提高了太赫兹的传感能力； 5. 太赫兹频段的准光学特性具有很好的传感、成像和定位功能。

太赫兹通信的路径损耗特性呈现出“传输窗”的特点，如图 4-2 所示，在传输窗进行通信时，路径损失会相对较小。 但是传输窗并不固定，受环境、天气变化的影响，同时跟传输频率和距离有关，因此利用太赫兹通信在受控或室内环境中进行传输更有意义。

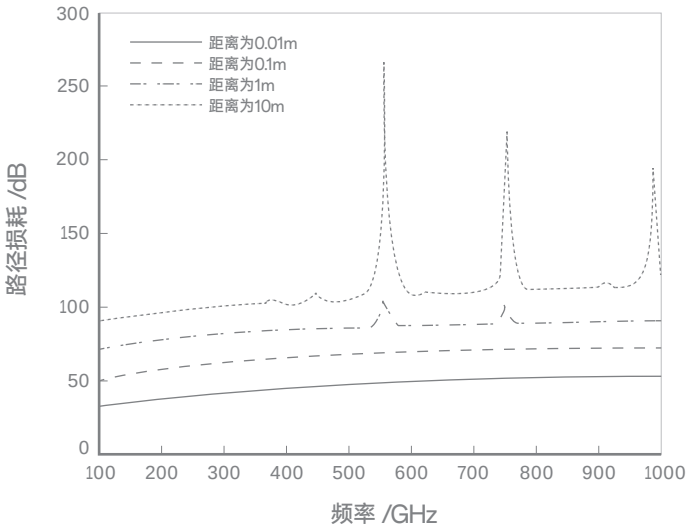


图 4-2： 太赫兹通信的路径损耗特性

太赫兹通信的特性使其适用于室内以及短距通信，因此将太赫兹技术与 D2D 通信技术相结合将是 6G 系统中的一个主要应用场景，其应用场景可以包括：

- 车联网： 车辆之间的超快海量数据传输；
- 通感融合： 车辆或手持设备通过侧行链路发送太赫兹信号，感知周围环境信息；
- 触觉通信： 实时传输触觉或感官信息；
- 人机接口： 通过人脑控制车辆、终端等；
- 室内应用： 如智能家居，高清全息游戏，VR，AR 等。

太赫兹波束管理的挑战与方法：

由于太赫兹工作频段极高，其对应的物理单元尺寸极小，使得一个天线面板集成成百上千根天线组成超大规模 MIMO（Ultra-massive MIMO）系统成为可能，太赫兹通信通过产生具有高波束赋形增益的锋利窄波束，可以克服太赫兹波段的通信距离限制问题，同时有望实现高能量效率和支持移动覆盖。

由于太赫兹波束极窄以及可容忍的传输延迟非常低，太赫兹窄波束管理中需要极高角度分辨率的的到达方向角 (Direction of Arrival，DoA) 估计和快速波束跟踪。 为了达到毫度级的 DoA 估计和毫秒级波束跟踪，在太赫兹通信中可以采用基于深度学习 (Deep learning，DL) 的波束训练的方法，比如基于 DL 的 DoA 估计的算法有深度卷积 神 经 网 络 (Deep convolutional neural network, DCNN)，卷积长 短 期 记 忆 (Convolutional long short-term memory，ConvLSTM) 等，可以在较低计算复杂度和波束训练开销的情况下捕获毫秒级别的 DoA 变化。

由于太赫兹系统带宽很大，会导致阵列方向图随频率而产生较大幅度偏移，从而产生波束斜视效应，波束斜视导致不同频率的波束无法对准，严重降低了系统性能。 因此，需要制定有效的训练方案来消除波束斜视效应。 为了缓解太赫兹系统中波束斜视效应，一种方法是将斜视波束重新聚合，为此可以采用基于时间延迟移相器的混合波束赋形结构和相应的训练方案，将频率无关的移相器替换为频率相关的 真 实 时 间 延 迟 (True time delay，TTD) 移 相 器，从 而 消 除 波束斜视效应。 另一种方法是将 波束的角度分开以扩大角度覆盖范 围，通过将波束分成不同的方向性 波束以获取角度扩展，在增加角度 覆盖的同时，不会降低每个子带的 方向增益，因此可以在保持距离覆 盖的同时实现较大的角度覆盖。

4.2.3 可见光通信

20 年前发光二极管（Light Emitting Diodes, LED）开始广泛应用，LED 得到发展不久后，可见光（Visible Light Communication，VLC）得到了研究界的广泛关注。 VLC 通信使用可见光（380-780nm）为数据载体，在正常照明前提下，将信息调制到 LED 灯发出的可见光中，接收端利用光电检测器将可见光转换为电信号，并从中解调出相应的调制信息。

1. 可见光通信的特点

可见光通信技术具有以下特点：

- 频谱资源丰富，数据传输速率高： 与射频信号相比，VLC 通信具有巨大的免费的光谱资源，能够实现非常高的数据传输速率，实现了 6G 中高传输速率的性能指标，此外，与 MIMO 技术相结合可以进一步提高传输速率。
- 穿透能力有限： VLC 通信和 RF 通信的主要区别在于所利用的电磁波的固有特性，射频波具有穿透大多数非金属材料的能力，而可见光只能穿透透明材料。
- 部署成本低、实现简单： 现有的 LED 照明设备进行改装后可用于 VLC 通信，成本低，且易于部署。
- 节约能源： VLC 通信无需消耗额外的电能，同一个设备既可以照明又可以作为数据的载体。
- 安全性、私密性好： VLC 通信的信号隔离特性可以防止对室内或建筑物内部通信的窃听，从而提高通信的安全性。

VLC 通信技术提出主要是用于室内和海下通信，但由于其高速传输速率的特性，被应用在很多领域，比如可利用智能台灯传递信息，在商场给顾客发送信息推送、隐形广告等； 基于 VLC 通信的车联网应用场景得到了广泛关注，可将交通信号灯和汽车车灯进行改装，通过 VLC 通信提高驾驶的安全性； 在车辆编队场景中，前后车之间可以通过车灯实现基于 VLC 的高速率数据传输； VLC 通信还可以用于可穿戴设备，用于实时健康监测。

2. 可见光通信的物理层挑战

虽然可见光频谱资源丰富，可以提供高传输速率，但是相对于传统的基于射频技术的通信系统，可见光用于数据通信会面临相应的挑战。

- LoS 径和 NLoS 径对接收强度影响大： LoS 径与 NLoS 径影响光的接收强度，另外，发射机的角度也会对接收强度有影响，发射机角度越宽，接收信号越弱，角度越窄信号越强。 当接收者的设备是移动设备，用户可以不断地改变方向，从而导致接收强度忽强忽弱。 因此，需要开发不在发射机的 LoS 径视野内的高速通信技术。 智能反射表面（Intelligent Reflective Surface，IRS）技术可以控制信号反射方向，将可见光通信和 IRS 技术相结合可以提升可见光传输性能。
- VLC 上行链路实现困难： 在室内环境中，智能手机和其他低功耗设备将信息发送回 LED 灯泡，上行链路若使用可见光通信，则需要在移动设备上添加多个光源，其中大多数光源的方向随机，可能会对人眼造成不适，目前的主要解决方案是利用射频、红外等技术建立上行链路。
- 移动性： 基于 VLC 的系统必须支持移动设备，为了使可见光通信成为一种无处不在的技术，需要有机制确保在系统覆盖范围内以不间断的方式高速连接。 为了使 VLC 系统在商业上取得成功，特别是在消费市场上，需要解决与信号覆盖和移动性相关的挑战。

3. 可见光通信的主要研究方向

可见光通信系统的其开放性和广播性，使其在一定空间内很容易受到窃听，为了提升可见光系统通信安全性，需要研究适用于可见光通信系统的物理层安全通信方法。 物理层安全通信是指利用调制，信号以及信道等属性的差异进行传输，不诉诸数据加密，发射前不需要密钥。 物理层安全通信主要有两种办法： 1. 利用无线信道的互易性和独特性，合法通信双方根据各自所提取的物理层信道参数独立生成密钥进行高层加密，这类方法可以避免密钥的传输泄露，主要难点是在有噪声干扰时双方如何生成一致的密钥； 2. 利用无线信道的空域属性实现物理层安全，通过一定的手段增加窃听方恢复信号的难度，提高其误码率来实现信息的低截获概率传输。

可见光通信系统的上行链路采用何种方案一直是待解决的问题，目前传统方案是将射频通信作为 VLC 系统的上行链路，即采用射频（Radio Frequency，RF）与 VLC 混合组网的方式。 在 6G 系统中，RF 与 VLC 混合组网的研究方向可能有：

（1）引入新的高效优化技术来提高混合 RF/VLC 网络的性能；

（2）使用软件无线电系统改进网络配置的实现；

（3）通过应用机器学习算法，进行频谱感知并利用最佳的射频或可见光光谱；

（4）寻找 RF/VLC 系统的新应用。

●6G 低时延高可靠 KPI 指标要求
●6G 低时延高可靠关键技术与系统设计

5.0 6G 低时延高可靠子系统

低时延高可靠（URLLC）是 5G 引入的一种应用场景，主要用于工业互联网、车联网等对时延、可靠性要求更高的关键物联网（Critical IoT）业务。可以预计，URLLC 子系统也将成为 6G 系统的重要组成部分。5G URLLC 在 Rel-15 版本中已初步支持，Rel-16、Rel-17 两个版本又相继增强，但其产业化进程并不顺利，尚未获得大规模商用普及。

究其原因，5G URLLC 是在 5G eMBB 基础上增强而来，在追求更低时延、更高可靠的同时，并没有针对工业互联网、车联网等场景对 eMBB 的冗余设计进行大量裁减，造成复杂度和成本不必要的叠加。试图同时兼顾多种业务场景，最终顾此失彼，对任何一个行业都不能做到足够优化。因此 6G URLLC 可以尝试更准确的定位目标市场，对技术特性做更大胆的取舍，实现针对关键应用场景的性能优化和成本控制，提高 6G 在这个横向市场的竞争力。

6G 低时延高可靠 KPI 指标要求

5.1

在 5G 中，URLLC 涵盖的范围很广，既包含要求中低速率、很低时延、很高可靠性的工业、交通等实时控制业务，也要涵盖很高速率、较低时延的 XR（混合现实）业务，这种矛盾性的 KPI 要求给系统设计制造了较大困难，容易顾此失彼，哪种业务的性能也无法真正优化。6G URLLC 子系统应根据不同目标业务的不同需求细分为如下两类，适度分别优化：

- **业务目标一： 使能工业、交通等中低带宽高可靠性实时控制，KPI 指标如图 5-1 所示。**

为满足工业自动化动态控制的效率、精度及可靠性需求，时延需要达到 1ms 及以下，可靠性要求为 99.99999%。对于采用视觉控制的系统，用户体验速率需要达到 100 Mbit/s。在高密度部署场景中，连接密度需要达到 10 devices/m²。要实现对高铁的实时控制，系统所支持的移动速度高到 500km/h。

- **业务目标 2： 高带宽实时交互多媒体娱乐，KPI 指标如图 5-2 所示。**

AR、VR 等实时交互多媒体娱乐业务不要追求工业控制类 URLLC 那么高的时延和可靠性性能，其时延要求可为 1ms，可靠性要求可为 99.999%，连接密度可为 1~5 devices/m²。但同时，AR、VR 对于数据速率的要求较高，特别是与 AI 结合使用后，用户体验速率需求将高到 10 Gbit/s。为满足下一代高铁列车内的应用需求，此类 URLLC 业务也需要支持 500km/h 的移动速度。

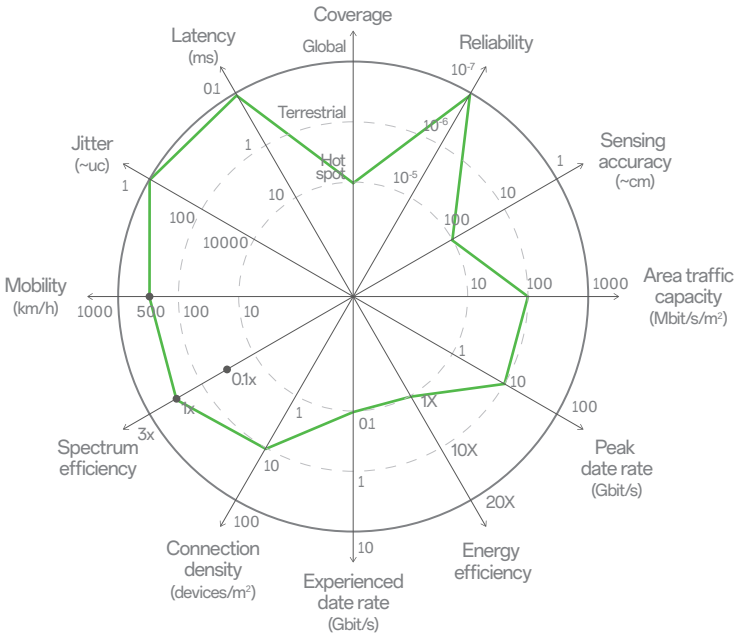


图 5-1： 6G 低时延高可靠子系统业务目标 1 的 KPI 指标

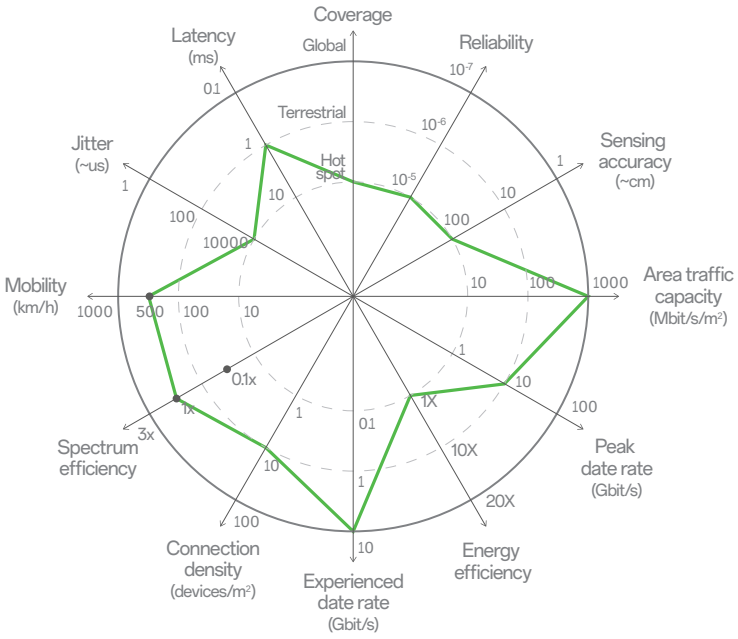


图 5-2： 6G 低时延高可靠子系统业务目标 2 的 KPI 指标

6G 低时延高可靠关键技术与系统设计

5.2

为满足高可靠、短时延且高速率传输的需求，6G 系统将进一步探索支持更大的传输带宽，更快的终端处理能力。

在 5G 系统中，当终端被配置使用高等级处理能力（对应较短的 PDSCH 处理时间、PUSCH 准备时间）时，所有的数据都采用高等级能力进行处理。 具体来说，对于同时支持宽带数据传输与低时延高可靠数据传输的终端，终端对于宽带数据的接收处理和发送准备处理也需要满足短时延业务的要求进行。 这样的处理方式一方面会影响宽带数据传输的性能及体验，另一方面由于终端总是处于高速数据处理状态因此终端功耗较高。 6G 系统中，在提升终端处理能力速度的同时也要考虑支持终端处理能力的动态切换，即在收、发宽带数据时采用较慢速的处理能力，在收、发短时延高可靠业务时切换为较快速的处理能力，从而有效降低终端功耗。

要实现终端处理能力动态切换，系统还需要支持灵活的时序关系，包括： 调度时序、反馈时序、复用处理时序等。 对于同一类型的数据（即对应相同处理能力的数据）传输，时序上依然可以需要满足类似 5G 系统的要求，例如： 调度在先的数据优先被处理、传输在先的数据优先被反馈。 但是对于不同类型的数据（即对应不同处理能力的数据）之间的时序约束应该放开或取消。 否则，终端采用较低处理能力接收一个宽带数据后，在该宽带数据未完成解调、反馈之前，后续传输的短时延数据都无法按照较高处理能力进行接收。

对于同时支持宽带数据和短时延高可靠数据的终端，支持同时独立收、发不同类型数据，即不同类型数据通过独立信道同时传输，可利于提高系统传输效率。

对于 TDD 载波，由于 TDD 上下行配置造成的 HARQ 重传时延需要进一步降低。 6G 系统中，可考虑使用不同上下行配置的载波进行聚合，并采用 HARQ 进程跨载波重传或多载波 HARQ 进程统一管理的方式降低 HARQ 重传时延。

另外，6G URLLC 子系统也可引入 AI 技术辅助实现如下功能：

- **数据到达预测： 基站通过预测数据到达时间及数据量，进行预先调度。 终端基于预测结果，实现完全的无调度传输或自主传输；**
- **调度、重传预测： 终端基于预测结果提前进行数据准备，从而降低数据准备时延。 基站或终端基于预测结果直接进行数据重传，而不需要等待反馈信息；**
- **冲突预测： 避免用户间或用户内的资源冲突。**
- **UCI（上行控制信令）增强： 基于 AI 算法对 UCI 信息进行压缩，降低反馈信息量。**

- 6G 感知 KPI 指标要求
- 6G 感知关键技术与系统设计
- 6G 感知子系统的两种模式
- 通信感知融合系统的关键技术
- 独立感知模式关键技术

6.0 6G 感知子系统

感知子系统是 6G 引入的一个新的子系统，虽然 5G 系统中已经包含定位功能，但全面的支持物理环境的感知，对移动通信系统还是一个新的变化。

6G 感知 KPI 指标要求

6.1

6G 感知功能将使能无所不在的感知能力，捕获物理世界的环境细节，支持虚拟世界的孪生重建。 6G 感知能力不仅包括目标识别，目标定位（测距、测速、测角）、目标跟踪和目标成像的能力，还将包括材质检测、模式识别和医疗辅助等。 为了满足上述 6G 感知能力，一些感知 KPI 被定义，特别是感知精度需要达到 cm 级别，如图 6-1 所示。 但同时，**由于 6G 感知子系统应首先保证在感知性能方面的市场竞争力，不可能要求其具有和 6G 宽带蜂窝子系统、6G URLLC 子系统相同的通信性能，在数据率、频谱效率、系统容量等各方面的要求应该适当放松，给感知性能的优化留出设计空间。**

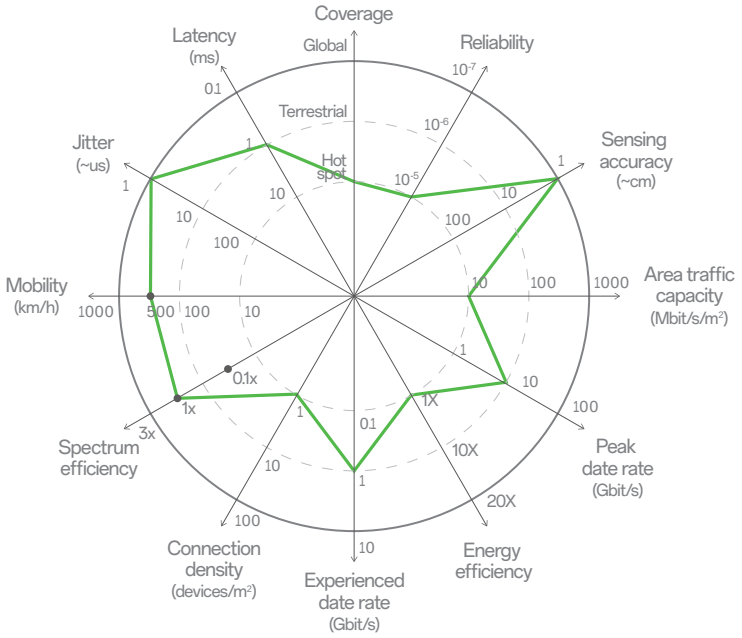


图 6-1： 感知子系统 KPI 指标要求

6G 感知关键技术与系统设计

6.2

6.2.1 6G 感知子系统的两种模式

在信号处理技术的历史上，感知和通信是需求不同、系统设计迥异的两种技术。 6G 希望将通信、感知两种技术融合在一个系统中，尽量复用软硬件资源，取得“一事两全”的效果。 但是客观地说，一个系统兼顾两种业务，两个业务共享资源，通信性能和感知性能可能都会受到一些影响，不可能完全发挥各自的技术潜力。 因此，**根据具体应用场景不同，6G 感知子系统可考虑支持两种模式： 通信感知融合模式和独立感知模式。**

通信感知融合模式适用于一个运营主体同时提供通信和感知业务、用户使用通信与感知多功能终端、使用通信 / 感知融合业务的场景。 这种情况下，融合设计可以实现通信和感知共享频谱、硬件资源，灵活协作，为通信和感知双重需求的场景提供一种高效的解决方案。 这种模式下，运营方和用户并不追求单方面性能最优，而是追求两种能力的性能均衡。

但是对于单纯的感知业务运营，独立感知模式可能就是更优的解决方案。 运营方希望把资源集中用于优化感知性能，以在专业市场上获得足够的竞争力，用户使用专用感知终端和感知业务，希望获得最优的感知业务感受。 通信能力在这种模式中主要提供感知相关信息、信令的传输。 这种模式下，系统应该按照感知性能优化选择关键技术、决定系统设计，且采用相对简单的协同实现方案，从而为感知强需求、通信弱需求的场景提供了一种优化且低成本的解决方案。

上述两种模式既可以选择一些相同的关键技术，也可以选择一些差异化的技术，如图表 6-1 所示。

	通信感知融合模式	独立感知模式
同性关键技术	参数估计技术，AI辅助算法，协同感知技术等	
差异化关键技术	通信与感知的硬件融合 通信与感知的信号融合 通信与感知融合的网络架构与组网	感知信号信道设计 感知硬件增强 感知系统的网络架构与组网

表 6-1： 通信感知融合模式与独立感知模式的关键技术

6.2.2 通信感知融合系统的关键技术

1. 通信与感知融合模式关键技术

• 通信与感知的硬件融合技术

无线通信与感知系统都是利用电磁波传递信息，一个是通过电磁波承载，一个是从电磁波的特性中提取。因为功能和需求不同，两者在信号收发模式，接收检测灵敏度，同步精度，以及射频通道的性能指标需求差异较大。现有系统都会独立设计，或者有所侧重，例如，雷达系统中也具备低速率的数据传输能力，但硬件设计还是以雷达需求为主。通感一体化技术需要将通信和感知功能融合，尽可能地复用一套硬件系统，得以在成本，尺寸和性能上取得优势。

• 通信与感知的信号融合技术

通信信号与感知信号的融合分为两个层次。一个层次是由同一个系统发出的信号既可以用于通信，也可以用于感知，但两者可以通过独立的信号承载，即系统级的通信信号与感知信号的融合。在这样的系统中，通信信号与感知信号可以在时域，频域，空间域进行复用。另外一个层次是通信与感知通过一个信号承载，即信号级的的通信与感知的融合。

2. 信号处理技术

6G 感知不仅包括经典参数估计，例如，目标识别，目标定位（测距、测速、测角）、目标跟踪和目标成像的能力，还将包括模式的识别，材料检测等。对于经典参数估计，一些经典的非线性算法，例如 FFT 和 MUSIC 算法是在复杂度和性能之间做了平衡。ESPRIT 算法复杂度高，但可以获得更优的检测性能。对于模式识别，材料检测等，不可避免地需要从物理世界采集大量的感知数据，这些感知数据采用 AI 算法将还原出更加丰富的信息。

3. 协同感知技术

协同感知技术通过多条感知链共同完成一个感知任务，提高感知结果的准确性与完整性，实现广覆盖。协同感知的模式也是多种多样，包括多节点协同感知、多频段协同感知以及多制式协同感知。其中，多节点协同感知和多频段协同感知可以广泛应用于基站与终端，多制式协同感知将无线感知与终端设备中的摄像头，重力感应等感知模块结合，提高用户体验。

• 多节点协同感知

多节点协同感知指在相同的感知制式下，多条感知链路之间的协同感知。该技术应用广泛，可以解决应用场景和设备实现中的非理想因素带来的问题，提高感知性能。具体包括：克服遮挡，实现连续覆盖和提升信号处理效果。

在上述多点协作感知用例中，可以抽象出多点协作感知的 2 个空口关键技术：感知节点选择和感知信息融合。此外，为了避免多节点感知信号的相互干扰问题，多节点的感知信号协调问题也需要考虑。由于需要多个感知节点之间协作通信，核心网的增强也是必不可少。

感知节点选择意在选出能够感知且感知结果可靠的感知节点。 其中，选择能够感知的节点既要考虑感知授权和安全问题，还要考虑感知节点的空口能力，例如，感知信号的带宽和发送功率，直接影响感知精度和感知范围。 感知节点的通信业务量，避免对通信无线资源的挤兑，降低通信速率。 感知结果的可靠性与感知节点和感知目标的相对位置有关，甄别影响感知结果的因素，以及这些因素对应的信号特征量，使得控制节点可以通过感知节点的测量上报筛选出优质的感知节点。 对于感知切换的场景，除了选择合适的感知节点，也要考虑感知切换过程设计，确保感知的连续性。

感知信息融合意在将多个感知节点的感知信息合并处理。 感知信息融合与单节点感知结果反馈相关。 因此，可以根据单节点感知结果反馈的类型，对应地将感知信息融合技术分为三种： 基于原始信道信息的融合、基于信道特征量的融合以及基于感知结果的融合。

对于基于原始信道信息的融合，控制节点可以获得完整的信道信息，最大程度地从大量的信道信息中挖掘出信号传输环境信息和感知结果。 对于基于信道特征量的融合和基于感知结果的融合，其好处在于单节点的反馈量下降，但由于反馈信息的缺失，控制节点可挖掘的信号传输环境信息有限，降低了融合效果。 一方面，可以通过一些融合算法或滤波技术，增强融合结果的准确性。 另一方面，也可以通过感知节点反馈一些辅助信息，辅助控制节点对多节点感知结果的融合处理。

- 多频段协同感知

6G 系统支持的工作频段会更广，包括低频，毫米波，太赫兹和可见光，不同频段有其适合的应用场景。 由于天然的物理性约束，不同频段电磁波所能提供的感知功能和业务能力是不同的。 理论上，频段越高、波长越短、频带越宽，提供的感知精度和时频分辨率就会越高； 但是，由于无线信号的衰减或遮挡，感知有效作用的距离和范围会越短越小。 通常，较低频段的通感融合信号可以实现大轮廓的粗浅感知，而较高频段的通感融合信号可以实现更精细感知。

4. 终端感知技术

- 多制式协同感知

当前的终端除了具有支持通信功能的硬件之外，还拥有大量用于提升终端交互体验的传感器，例如摄像头、加速度计、陀螺仪、光线传感器、距离传感器、重力传感器、磁场传感器、气压传感器等。 随着终端形态、人机交互功能的不断演进，未来的 6G 终端将拥有越来越丰富的传感器。 终端的这些传感器能够针对终端周围的物理环境提供丰富的感知信息。 为满足 6G 丰富的感知需求，可以考虑将这些基于专用传感器的其他感知技术与无线感知进行结合。 与单一的无线感知相比，这种多制式协同感知可以利用不同感知技术的独特优势来更准确、全面地感知物理世界。 多制式协同感知的增益主要来自于不同制式感知技术获得的感知信息的融合。 由于不同制式的感知信息具有不同的数据属性、感知精度、感知范围、数据格式，不同制式的感知信息的融合是多制式协同感知的关键技术。

- 感知信号资源分配

如上文所述，在通信和感知融合的网络中一个信号可以同时满足通信和感知的需求，从资源分配角度，感知参考信号的资源分配即为通信资源分配。 在现有侧行通信系统中，侧行通信资源可以由网络调度或由终端自主选择。 网络调度的资源分配需要网络运营商的参与，而且终端必须位于运营商的网络覆盖之下。 终端自主选择主要依靠解码资源预留信息，然后根据 RSRP 测量进行资源筛选实现。 在 6G 侧行通信中，可以通过强化学习进一步提高终端自主资源选择的性能。 这些侧行通信资源分配方式可以同时用于解决通信感知信号资源分配的问题。

如果感知信号不同于通信信号，而且感知信号和通信信号之间没有静态的资源划分，则感知信号资源分配需要解决感知信号和通信信号之间的干扰以及感知信号之间的干扰。 对于终端自主资源选择，在资源筛选过程中需要同时考虑用于感知信号和通信信号的预留资源。 如果感知信号和通信信号之间存在静态资源划分，感知信号资源分配只需要解决感知信号之间的干扰，用于感知信号的终端自主资源选择和通信信号类似。 然而，如果强化学习用于感知信号资源选择，需要纳入感知相关的优化目标，例如最大化检测概率，最大化感知精度等，当感知信号和通信信号之间没有静态资源划分时，甚至需要同时考虑通信相关的优化目标。

5. 网络架构与组网技术

在通信感知融合的网络架构中，如图 6-2，核心网中增加感知控制网元和感知收集实体。 感知控制网元负责控制面消息交互，包括对感知业务请求的鉴权 / 授权、面向区域或面向特定目标的感知控制，感知结果的对外开放等。 感知节点探测的感知数据一般为点云信息，数据量大，适合经由用户面进行感知数据的上报，感知控制网元将感知收集实体的 IP 地址提供给基站 /UE，基站 /UE 将感知数据通过 IP 路由直接上报到感知收集实体。 感知收集实体可以对收集到的感知数据进行分析产生最终的感知结果。 感知收集实体将感知结果发送给感知控制网元，由感知控制网元通过网络开放功能开放给外部应用，或者如果感知结果数据量依然很大，也可以是应用功能从感知控制网元得到感知结果的获取地址，再通过用户面访问感知收集实体获得感知结果。 在实际部署中，感知控制网元和感知收集实体可以分开部署或者集中实现在相同网元中。

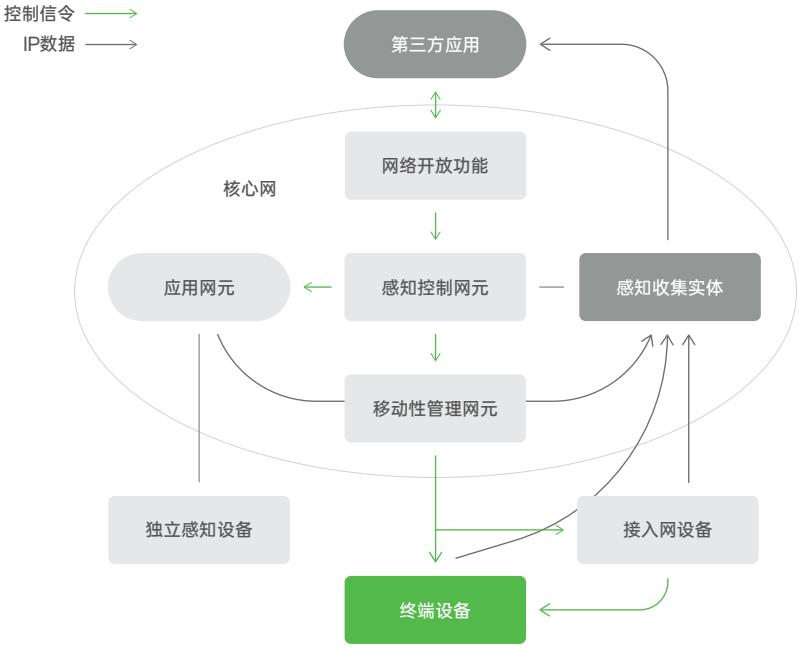


图 6-2： 通信感知融合的网络架构

6.2.3 独立感知模式关键技术

1. 高性能高精度的硬件设计	为了满足感知需求，高隔离度的系统设计和高性能高精确度的器件要求都是必不可少的。 前者是避免双工系统的自干扰问题的必要手段，后者使能大带宽数据处理与精准的同步。
2. 信号与信道设计	感知波形大多是规则的已知信号，要求具有优良的自相关特性、很大的信号带宽、很高的动态范围，可以容忍大的多普勒频偏，以估计运动目标的速度。 对于独立感知的模式，只需要考虑感知的需求，因此，一些经典或先进的雷达探测信号都可以考虑，例如线性调频连续波 FMCW。
3. 网络架构与组网技术	为了支持独立模式的感知设备，还可以在核心网中部署运营商管理的应用网元，负责通过应用层交互从独立模式的感知设备获得感知数据。 这个应用网元接受感知控制网元的控制，并可以向感知收集实体进行感知数据的汇报。

7.0 6G 超大规模 IoT 子系统

- 6G 超大规模 IoT 技术需求
- 技术需求
- KPI 指标要求
- 6G 超大规模 IoT 关键技术与系统设计

6G 超大规模 IoT 技术需求

7.1

5G 设计之初，就将 massive MTC 列为 5G 的三大需求场景之一，旨在在 5G 时代满足来自垂直行业日益增长的物联网通信需求。因此，在过去的十年期间蜂窝物联网通信技术与标准逐步得以发展。其中，3GPP 标准化了 MTC（Machine Type Communications，机器类通信）、NB-IoT(Narrow Band IoT，窄带物联网) 和 RedCap（Reduced Capability UE，缩减能力终端）等一系列的物联网技术。这些物联网技术采用小带宽、单天线、降低峰值速率、半双工、降低发射功率等技术显著降低了物联网终端的成本。进一步地，通过引入 eDRX（enhanced Discontinuous Reception，增强的非连续接收）、PSM（Power Saving Mode，节能模式）、节能 BWP（带宽部分）等技术极大降低了物联网终端的功耗。同时，可以支持大量物联网终端接入网络，从而满足大连接的需求。得益于这些技术，物联网蓬勃发展。截止 2022 年 8 月，中国物联网订阅数达 16.98 亿，已经超过 16.78 亿个人用户。

在 6G 时代，随着物联网技术在千行百业的推广应用以及在个人消费者生活中的普及，可以预见物联网将真正得以爆发式增长。人们将迎来千亿甚至万亿级的物联网链接，物联网技术将持续变革社会经济发展以及人们的生产生活方式。

7.1.1 技术需求

6G 超大规模 IoT 的技术需求包括：

更大链接数	随着物联网技术的进步，物联网在各行各业将加速普及。能源、工业、交通、物流、农牧业、医疗、环保等等行业以及智能家居、可穿戴、大健康等个人消费领域均将显著受益于物联网技术的发展。因此，6G 超大规模 IoT 需支撑更大的链接数，同时可以提供高质量的物联网服务。
多层次 / 多功能的物联网	面对不同的应用需求，未来的物联网中会存在多层次的需求。基于使用场景、部署方式等方面的不同，物联网终端的成本、传输速率、通信时延、覆盖需求、终端功耗等也将呈现多样化、离散化的特征。物联网也将支持物体识别、传感数据获取、定位信息采集等多方面的功能。 面向不同的需求，5G 时代针对性研发了 NB-IoT、MTC、RedCap 等技术。6G 超大规模 IoT 在设计之初需要针对不同的场景须做好精细的技术统筹，在满足多样化需求的同时协调好技术之间的兼容互通，从而最大化降低标准研发与产品开发成本。
物联网与多技术的融合能力	6G 超大规模 IoT 具备与多种 6G 技术融合的能力。物联网终端借助于其无处不在的感知能力，可天然地与通信感知技术有机融合，增强 6G 网络的感知能力。泛在的物联网链接可实现低成本、超大规模的数据采集，更好使能 6G AI 技术。车载或路侧物联网终端将更好地构建智能 V2X 系统。物联网的低功耗、低成本等技术也将可能应用于 6G MBB 的终端节能中。 因此，6G 超大规模 IoT 的设计须考虑多技术融合的需求。

覆盖未满足的物联网通信需求

物联网蓬勃发展，但仍有很多场景下的物联网通信需求无法使用现有技术得到满足，例如：

严苛的通信环境

某些物联网场景，可能面临高温、极低温、高湿、高压、高辐射或高速运动等极端环境。 如超高压变电站、高速运动的列车车轨监测、高寒地带环境监测、工业产线等。 在这些场景中，受限于常规电源的工作环境限制，现有物联网终端将无法工作。 另外，极端的工作环境也不利于物联网的维护，如更换电池。

极小尺寸的终端形态需求

某些物联网通信场景，如食品溯源、商品流通以及智能可穿戴等要求终端具备极小的尺寸以方便在这些场景下使用。 例如，用于流通环节上商品管理的物联网终端通常使用电子标签的形式，以非常小巧的形态嵌入到商品包装。 再例如，轻巧的可穿戴设备可以在满足用户需求的同时提升用户使用体验。

极低成本的物联网通信需求

众多的物联网通信场景要求物联网终端的成本足够低廉，从而提升相对于其他可替代的技术的竞争力。 如物流或仓储场景，为了便于管理大量流通的物品，可以将物联网终端附着在每一件物品上，从而通过该终端与物流网络之间的通信完成物流全过程、全周期的精确管理。 这些场景要求物联网终端价格具备足够竞争力。

因此，为了覆盖这些未满足的物联网通信需求，6G 超大规模 IoT 需要研发超低成本、极小尺寸、免电池 / 免维护的物联网。

7.1.2 KPI 指标要求

6G 超大规模 IoT 子系统的特色 KPI 包括：

- **需要支持低功耗甚至极低的功耗，如部分场景需要支持毫瓦级甚至微瓦级的通信功耗；**
- **需要支持更大的连接；**
- **需要支持从短距离覆盖（几十米），中距离覆盖（数百米级别）直至数公里的多样化覆盖需求；**

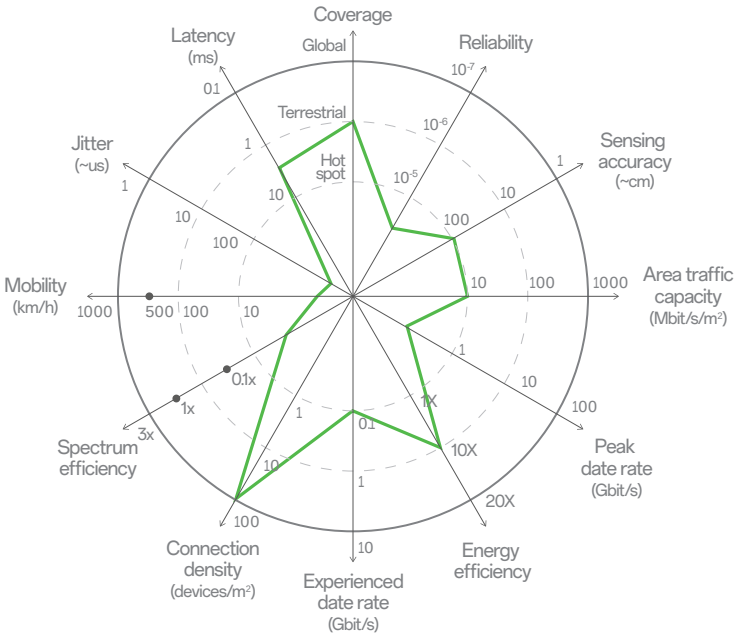


图 7-1： 6G 超大规模 IoT 子系统 KPI 指标

而其他常规 KPI 如峰值速率、通信时延、移动性、频谱效率等方面相对 eMBB 通信而言要求不高。 如部分通信场景的峰值速率可低至几十 kbit/s； 部分固定部署的场景对移动性没有要求； 可以使用专网部署或在移动通信网的业务低谷使用频谱，因此不要求高的频谱效率。

6G 超大规模 IoT 关键技术与系统设计

7.2

6G 超大规模 IoT 子系统可能采用的关键技术包括：

免电池通信技术

如前所述，为支持更多的应用需求，支持免电池通信将是 6G 超大规模 IoT 的重要需求。 为此，需要研究免电池通信技术。 物联网终端可以从各种环境能量，如光、无线电波、热能、震动能等汲取通信所需要的能量，从而摆脱对传统技术的依赖，这类终端可称之为零功耗物联网终端。

其中，基于无线电波的能量可以从 6G 网络中提供，需要研究如何高效合理的向零功耗物联网终端提供无线电能量。 进一步地，也需要研究如何提升终端的能量采集效率与采集灵敏度。

另外一方面，各类环境能量具有如下特点：

- 可提供的环境能功率低，普遍在数微瓦至数毫瓦的区间
- 环境能量不稳定，如晴朗的白天可以获得充足的光照，而晚上或阴天光能不足。

因此，需要研究适应上述特点的免电池通信技术，如超低功耗通信技术、能量管理技术、能量自适应的通信协议。

低功耗 / 超低功耗通信技术

不管是有源的物联网终端应用场景，还是上述免电池免维护的物联网终端。 降低终端的功耗甚至达成超低功耗通信可显著提升终端使用寿命、降低使用 / 部署成本、有助于节能环保（考虑未来巨大数量的物联网终端的功耗）。 因此，低功耗 / 超低功耗通信将是物联网技术永远不变持续努力的技术追求。 当前的物联网终端的工作功耗普遍在几十至数百毫瓦，低功耗 / 超低功耗通信的终端功耗需要降低至 1 毫瓦之下。

可考虑如下方式实现低功耗 / 超低功耗物联网通信：

- 极简的收发信机与极简调制方式

在面向物联网的 MTC、NB-IoT 以及 RedCap 等技术中，虽然终端的能力相对 LTE 终端或 NR 终端有显著的降低，但基本继承了这些传统的调制或编码方式。 例如 MTC/NB-IoT 可以支持 BPSK、QPSK 和 16QAM 等调制方式以及 Turbo 码和卷积码、而 RedCap 也可以支持 BPSK、QPSK、16QAM 和 64QAM 以及 LDPC 码和 Polar 码。

然而，这些对于普通的终端常用的调制和编码方式，对于低功耗 / 超低功耗通信终端而言却是极大的挑战。 低功耗 / 超低功耗通信具有极简的射频和基带结构，同时低功耗 / 超低功耗通信终端需要以超低功耗的方式进行数据传输。 因此，对于低功耗 / 超低功耗通信终端可使用的信号调制和编码方式均会带来较强约束与限制。 具体而言，极简的射频和基带结构使得终端难以同时实现相位和幅度调制和解调制，因此 QPSK、QAM 调制难以支持。 而尽管具备出色的信号编译码性能，Turbo、LDPC、Polar 以及 Convolutional 等前向纠错信道编码方式对于追求极低复杂度和极低功耗的低功耗 / 超低功耗通信终端，也难以支持。

一些低功耗技术如开关调制技术、反向散射技术（如图 7-2）可有机结合起来，使得终端以极其简单的硬件结构实现 ASK、FSK 或 PSK 等调制方式，从而实现反向散射的方式的数据传输。 使用开关调制技术，低功耗 / 超低功耗通信终端在硬件上仅需要具备调整其电路阻抗、电容或相位延迟的能力，即可实现信号的调制与反向散射传输。 另一方面，简单的 ASK，FSK 或 PSK 等信号也使得信号解调制也可以通过简易的硬件结构即可实现，例如可以通过一个比较器即可实现对 ASK 信号的解调制，在规避了复杂的基带信号处理的同时，也极大地降低了终端功耗。

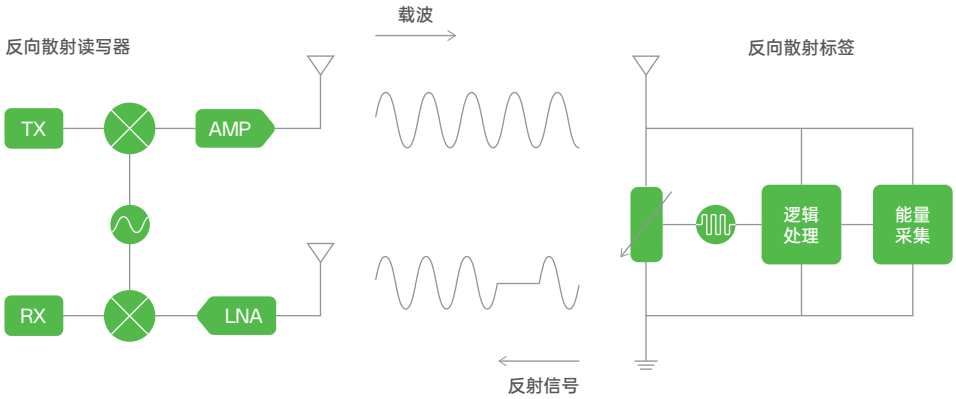


图 7-2 反向散射通信原理图

- 极致节能机制

针对低功耗 / 超低功耗通信，可在现有的节能机制如 DRX、 eDRX、 WUS、 间歇性控制信道监听等方案的基础上，进一步设计更极致的节能机制，例如基于业务需求按需触发通信需求，其余时间终端处于深睡眠状态。

同时，也要设计合理的能量管理机制，针对微弱的采集能量进行精确的管理，最大化提升能量的使用效能，提升能量的使用效率。

可灵活裁剪的协议架构

针对低功耗 / 超低功耗通信，除了需支持极简的物理层技术，也需要支持灵活可裁剪的协议架构，针对不同的使用需求而灵活裁剪。 而对于要求极低功耗的环境，可使用轻量化协议架构。

设计轻量化协议架构可能的思路包括： 支持免连接的通信，大幅简化接入过程，节省连接建立所需的信令开销与协议层需求。 大幅压缩协议的层级，仅保留支持小数据包的必要的控制信令与数据面头开销。

丰富的通信安全套件集

针对 6G 超大规模 IoT，需要保证用户的隐私与通信安全。面对不同的应用场景以及对应的不同的安全需求，需设计丰富可选的通信安全套件集合，以适应不同终端能力等级的不同需求。

低功耗、超低功耗设备能支持的计算、存储和传输资源都相对传统终端非常有限，传统的安全机制受到资源限制的挑战，需要研究如何在资源受限的条件下仍然为用户提供可信的接入与安全的传输。

面向 6G 万物互融的海量链接与设备，高效的分布式认证授权需要在当前集中式的信任机制上进行重新设计，以保证可信的身份、灵活的授权及分布式认证。区块链是较好的技术选择，但需要从基础设施的建设和生态的成熟等方面考虑以支持多场景、多业务、多用户的可信安全机制。

对于低功耗、超低功耗设备，可信的身份管理、可靠的安全传输是保证业务、网络、用户权益的必要条件，需要在传统的安全机制基础上，结合设备成本低特点进行优化传输安全机制，考虑数据传输的分层分级保护机制，研究物理层、传输层结合的增强安全方案。

支持超低功耗定位

很多 IoT 场景提出明确的定位需求。6G 超大规模 IoT 需要支持定位功能，尤其是对于低功耗、超低功耗设备也需要一定的定位功能，如生产线的产品精确管理、实现室内低成本定位（如商场导航、停车场导航，如下图 7-3 所示）以及物流等。这类应用中，终端设备将具备极低的复杂度，且可能使用环境能量驱动自身工作而因此仅支持极低的工作功耗（如小于 1 毫瓦），需要研究对于这类简单设备如何达到一定的定位精度（如米级别或亚米级别）。

图 7-3 室内定位场景示例

8.0 6G 空天通信子系统

- 6G 空天通信 KPI 指标要求
- 6G 空天通信关键技术与系统设计

6G 空天通信 KPI 指标要求

8.1

6G 空天通信子系统 KPI 指标要求如下图。6G 空天通信的业务类型虽然和 eMBB 业务类似，但由于其传输环境的限制，空天通信并不追求很高的数据率，主要强调业务的覆盖能力。

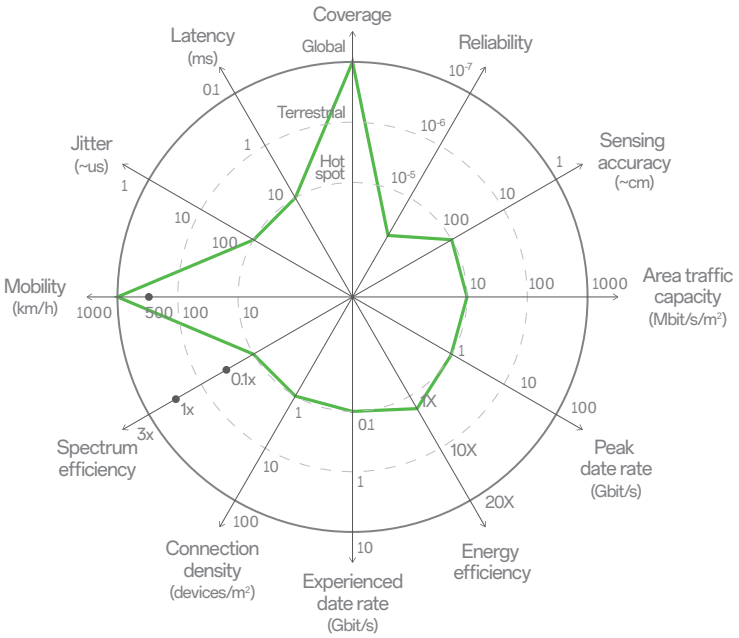


图 8-1： 6G 空天通信子系统 KPI 指标

6G 空天通信关键技术与系统设计

8.2

对于新一代通信技术的推广，一个很大的挑战是运营商需要花费大量的成本布署网络来达到广覆盖，因为对于很多国家地区而言至今无法达到全覆盖。在国内，即便在 4G 和 5G 系统基本实现全国覆盖的情况下，在某些特定区域仍然无法提供通信覆盖，例如海洋，高山。这里的覆盖限制主要归因于时间，成本，或者地理环境限制。未来 6G 系统需要打破这些限制，真正的实现全覆盖。随着航天运输的成本逐渐降低，空天通信可以更有效的打破地理限制，为真正全覆盖提供有效的技术。

5G NR NTN 系统虽然提供了一个最基础的终端与卫星通信的框架，然而并没有对终端功耗做进一步优化。例如 5G NTN 终端需要频繁的通过终端 GPS 系统来调整上行同步。这使得 NTN 终端相比传统的蜂窝终端需要消耗更大的能耗，因此为了进一步提升移动终端的节能效果，对于 6G 终端的能耗问题需要进一步做优化。除此之外对于高速场景的支持也是 6G 空天通信的重要目标，如何在提高覆盖的情况下进一步的提升传输速率也是一个对于 6G 空天通信的挑战。

在 5G NR NTN 系统中，由于延用了 NR 的 OFDM 波形以及 OFDMA 多址接入技术，使得 NTN 对于多用户的上行同步较为敏感。传统的以基站控制为主导、利用 MAC-CE 调整上行同步的方法已经不能满足上行同步的要求。取而代之的是需要终端根据网络提供的卫星星历信息自主调整和维护上行同步。这样使得终端的功耗大幅上升。6G 空天通信系统可以考虑和地面系统的波形解绑，设计一个更符合卫星通信的波形，例如单载波波形，从而使得系统对于上行同步的要求可以大幅降低，这样终端可以节省用于同步维护的功耗。

另外，由于卫星的覆盖面积广大，为了保证良好的链路预算，卫星侧通常利用波束赋形的方式发送和接收信号。然而 5G NR NTN 系统并没有对于卫星波束管理做进一步优化，这样导致的问题是当用户数增加，或者当小区内的卫星波束数量增加后，卫星波束间切换的信令开销会大幅增加从而减少了频谱效率。对于 6G 空天通信系统，针对卫星波束的高效波束管理机制将是一个必要的研究方向。

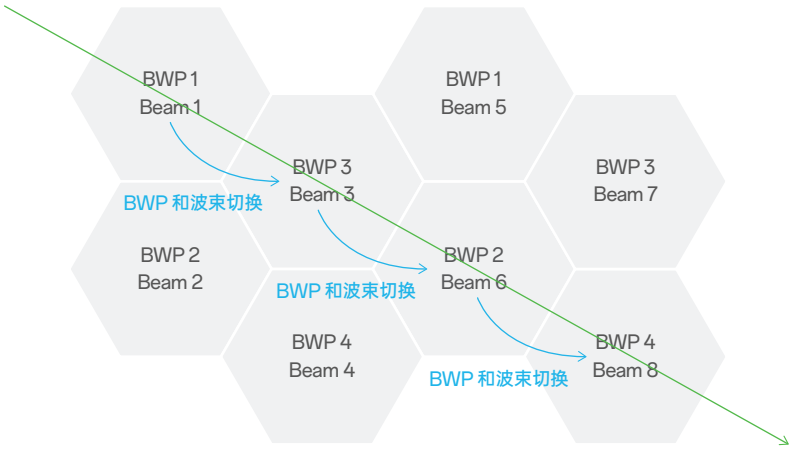


图 8-2： 6G 空天通信的波束管理

除此之外，卫星和地面网络的双链接将在很大的程度上增加用户体验。试想一下，当卫星的广覆盖特性提供用户的基本覆盖连接，而地面网络可以额外提供用户高速率用户体验，这样既可以保证高速率业务需求同时也可以大幅减少用户由于移动性导致的频繁小区切换。目前 5G 仅支持地面网络的双链接，6G 需要进一步研究空天通信的双链接功能。

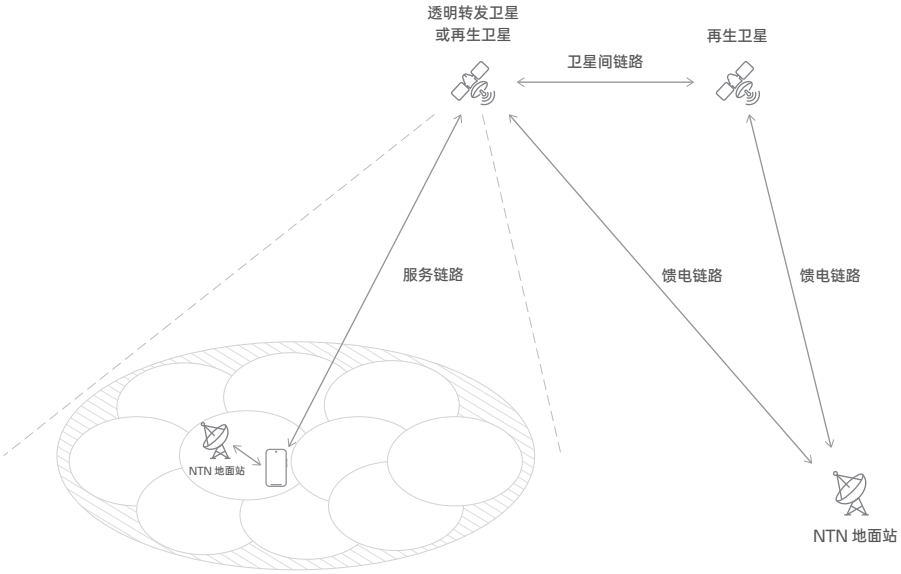


图 8-3： 6G 卫星和地面网络的双链接

另一方面，对于卫星网络本身的大速率传输在 5G 时代也受到一定的限制。主要的原因是 5G NR NTN 以透明转发为基础，这样由于终端到卫星和卫星到地面站的叠加传输延迟导致无法支持大速率传输业务，而要支持这类业务必不可少的需要考虑基站上星的场景。因此再生转发的架构需要在 6G 系统中被重点考虑，这里不可避免的需要进一步研究星间传输所导致的问题，因此再生转发也将成为 6G 空天系统下的一个重要课题。

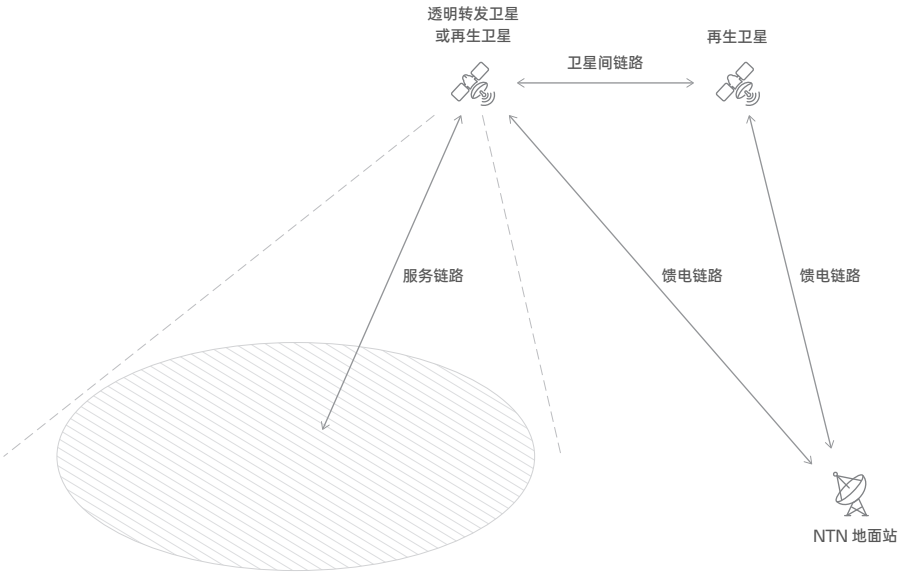


图 8-4： 6G 卫星系统的再生转发

最后，基于侧行链路（sidelink）的点对点直连通信技术可以在空天系统的框架下进一步扩展。目前侧行链路通信的传输机制有覆盖内（in coverage）和覆盖外（out of coverage）两种。后者即当侧行链路通信用户不在网络覆盖范围内时，侧行链路通信的传输将回退到一种避免碰撞的先听后传模式，这种模式传输延迟长，终端功耗开销大，传输效率相对低。如果可以结合空天通信系统在卫星的覆盖下完成侧行链路通信传输，将大大缓解上述的问题。

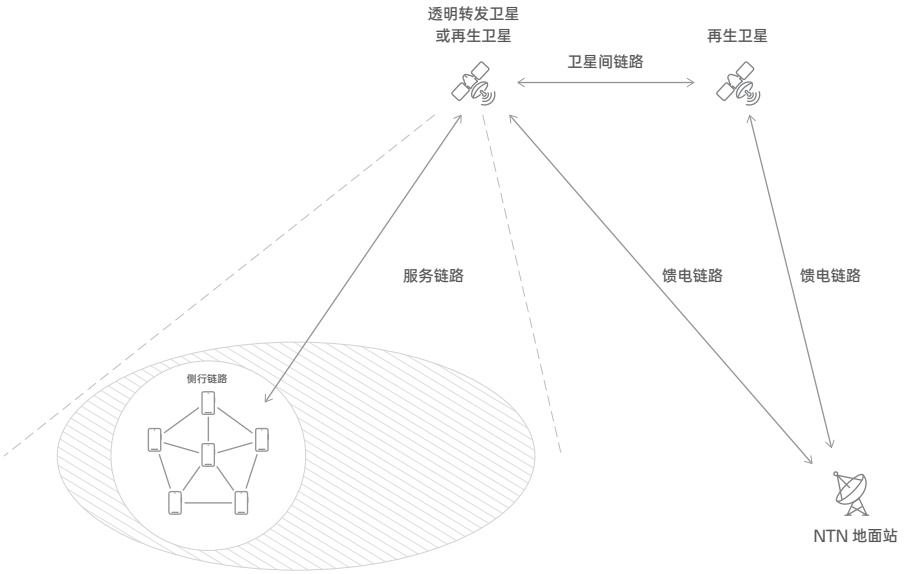


图 8-5： 采用 6G 卫星网络增强 sidelink 用户的覆盖

9.0 总结

本白皮书的核心观点如下：

- 移动通信实际上并不是通过一代技术实现一次产业升级，而是每两代技术实现一个大的产业升级目标。
- 6G 的历史使命，是基于 5G 的经验教训，彻底实现“移动的世界”的目标。
- 5G 仍然基于“单一功能系统”的系统设计原则，面向一套“刚性管道指标”（即高速率 + 低时延高可靠），在技术上追求一体化设计，尝试通过“多参数集 + 网络切片”兼顾千行百业的细分业务需求。但由于 5G 各垂直技术均以 eMBB 作为基线（baseline）和缺省设计，限制了技术创新空间，无法针对目标垂直领域做彻底优化，在很多垂直领域并未实现比较优势和可控成本。
- 十年来两个发现，决定了 6G 的新定位：

  ——第一个发现：构建移动的信息化世界，必须引入 AI（人工智能）智能体作为人、机、物之间的中间管理者。

  ——第二个发现：构建移动的信息化世界，必须为机、物、智能体构建一个与物理世界对应的虚拟世界。

- 6G 的愿景应该是： 沟通虚实世界的智能体，实现两个世界的互通互融，成为元宇宙的基础设施，为移动信息化世界提供一个技术底座。
- 6G 要实现物理世界和虚拟世界的 “互通互融”，真正实现“系统多能化，世界移动化”，进一步扩展到通感、空天、零功耗等应用场景，以可控的成本实现在各个维度上几倍的性能提升，必须要采用新的设计思路。
- 6G 极简多能系统的设计主要包含如下要素：

  ——由一个最小化的极简核心提供内生智能、安全、灵活频谱管理等共性能力；

  ——针对四个不同能力方向做专门优化，包括：云连接（Clouding）、关键物联（Critical IoT）、泛在物联（Ubiquitous IoT）和感知（Sensing）。

  ——在每个能力方向上设计一到两个子系统，可以根据应用场景、频谱、接口类型等独立选择关键技术，分别进行硬件系统设计。如可分为：6G 宽带蜂窝、6G D2D、6G URLLC、6G 定位与感知、6G 大规模物联网、6G 空天通信等子系统。

  ——子系统之间按需选择是否保持空口兼容性，按需确定多大程度与 6G 宽带蜂窝子系统共用空口技术与硬件设计。

  ——以黑箱化、专业化的 AI 算法库替代通用而复杂的传统软件算法，实现各子系统的“相对独立、各自优化”和通信协议的大幅简化。通过多种 AI 算法的切换和组合，实现多个子系统的切换和组合。

- AI 技术将是 6G 网络的重要组成部分，不同于控制面对应的灵活性维度和用户面对应的性能维度，AI 技术对应的智能维度将成为 6G 网络的一个新维度。
- 由子系统集构成的 6G 系统的一个核心问题，是如何能按需配置网络资源，真正为各个垂直行业部署“能力够用、成本可控”的 6G 子系统。 由于千行百业的需求千变万化，这种按需组网难以靠人工方式实现，应该通过 AI 训练，采用智能化方式实现。
- 智能化替代即将相当一部分传统协议、传统算法替换为“黑箱化”的 AI 协议和 AI 算法。 各种 AI 应用例（use case）的标准化影响基本都是类似的，无非是要定义 AI 的生命周期管理（Life Cycle Management，LCM），包括 AI 数据采集、AI 模型的训练、部署、管理、传输、激活、选择、切换、配置及推理等。
- 对于 6G 安全架构来说，关键变化体现为以下两点： 安全信任模型由双向信任变为多方信任，需要建立多方信任模型与内生安全； 安全保护的业务数据由单一变为多元，需要建立多元的业务数据与智能安全。
- 6G 灵活频谱分配的核心，是借助区块链技术来实现频谱的灵活共享。
- 在当前针对 6G 系统的空口 AI 化演进的过程中，有必要对研究的路线、所受的限制条件、基础问题，以及期待的突破与改变做出较为客观和明确的判断，并相应构建短、中、长期演进规划，以在不同层面和维度上获得理论与工程上的增益与突破。 6G 空口的 AI 化替代包括基于 AI 的系统赋能和基于 AI 的系统重构两个层面。

- 6G 空口 AI 化的研究将不只在已成型的具体无线用例上做修补优化型演进，而是从系统重构的角度出发，开展无线 AI 共性基础问题的深度剖析，包括： 未来无线通信系统的一体化、系统化 AI 设计研究； 针对小样本、场景自适应、可在线更新需求的无线 AI 解决方案分析； 以智能信道建模与虚拟重构为代表的无线 AI 数据集构建等问题。
- 随着 6G 系统中可用频段越来越高，通过基站实现无缝覆盖变得越来越困难，利用 D2D 技术实现终端到终端之间的直接通信会成为 6G 系统中越来越重要的通信方式。 另外，D2D 技术可以和其他技术相结合，如基于侧行链路的定位技术、感知技术、大规模 IoT 技术、人工智能等，因此，D2D 技术将成为 6G 系统中最重要的技术之一。
- 6G URLLC 子系统应根据不同目标业务的不同需求细分为两类，适度分别优化： 使能工业、交通等中低带宽高可靠性实时控制； 大带宽实时交互多媒体娱乐。
- 6G URLLC 子系统可引入 AI 技术辅助实现如下功能： 数据到达预测； 调度、重传预测； 冲突预测； UCI（上行控制信令）增强。
- 由于 6G 感知子系统应首先保证在感知性能方面的市场竞争力，不可能要求其具有和 6G 宽带蜂窝子系统、6G URLLC 子系统相同的通信性能，在数据率、频谱效率、系统容量等各方面的要求应该适当放松，给感知性能的优化留出设计空间。
- 根据具体应用场景不同，6G 感知子系统可考虑支持两种模式： 通信感知融合模式需要研究硬件融合、信号融合、信号处理、协同感知、终端感知、网络架构与组网等技术； 独立感知模式。
- 6G 超大规模 IoT 的特色 KPI 包括： 支持低功耗甚至极低的功耗，如部分场景需要支持毫瓦级甚至微瓦级的通信功耗； 支持更大的连接； 支持从短距离覆盖（几十米），中距离覆盖（数百米级别）直至数公里的多样化覆盖需求。
- 6G 超大规模 IoT 子系统可能采用的关键技术包括： 免电池通信； 低功耗 / 超低功耗通信； 可灵活裁剪的协议架构； 丰富的通信安全套件集； 支持超低功耗定位。
- 6G 空天通信子系统应研究如下关键技术： 终端的能耗优化、传输速率提升、和地面系统适度解绑的波形设计、高效卫星波束管理、空天通信的双链接、再生转发、卫星覆盖下的侧行链路通信等。

最后，面向 6G“极简多能”的系统架构，考虑 3GPP 在 6G 标准化各阶段的工作容量，可考虑按如下两个阶段完成 6G 标准化：

- 第一版本（Rel-21）首先完成极简核心、宽带蜂窝和 D2D 子系统。
- 第二版本（Rel-22）开始补充 URLLC、定位感知、空天通信与大规模 IoT 子系统。

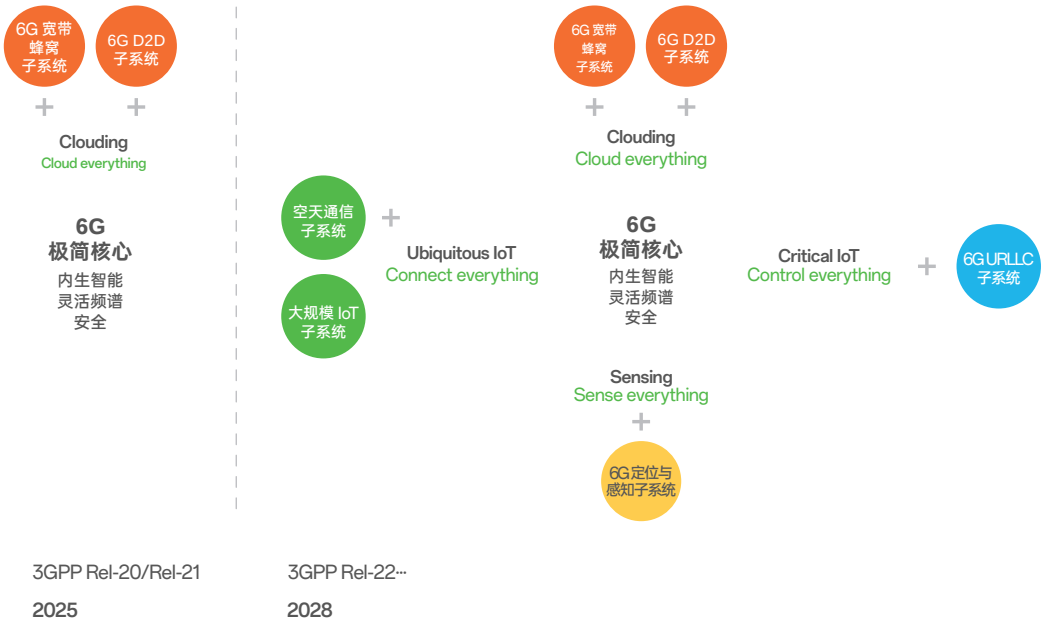


图 9-1: 3GPP 6G 标准化阶段划分

参考文献

[1] Pouyanfar S, Sadiq S, Yan Y, et al. A survey on deep learning: Algorithms, techniques, and applications[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2018, 51(5): 1-36.

[2] Chen M, Challita U, Saad W, et al. Artificial neural networks-based machine learning for wireless networks: A tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3039-3071.

[3] OPPO Research Institute. 6G Withe Paper: 6G AI-Cube Intelligent Networking [R/OL]. (2021-07-14)[2022-08-15] https://www.computer.org/publications/tech-news/trends/oppo-6g-white-paper

[4] 6GANA TG2 《6G 内生 AI 网络架构 10 问白皮书》

[5] 3GPP TS 33.501

[6] NIST SP 800-207《Zero Trust Architecture》

[7] 陈明，《未来通信网络中基于机器学习的自适应资源调度算法设计与实现》，北京邮电大学，2018。

[8] 王萍，陆岩，王帅，姚汪鼎，《一种基于预留 - 重用联合的 C-V2X 通信 Q 学习型半持续调度算法》，电子与信息学报，2022 年，第 44 卷第 8 期。

[9] 方维维，王云鹏，张昊，孟娜，《基于多智能体深度强化学习的车联网通信资源分配优化》，北京交通大学学报，2022 年，第 46 卷第 2 期。

[10] H. Ye, G. Y. Li and B. -H. F. Juang, "Deep Reinforcement Learning Based Resource Allocation for V2V Communications", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 4, April 2019.

[11] S. Nie, Z. Fan, M. Zhao, X. Gu and L. Zhang, "Q-learning based power control algorithm for D2D communication", IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2016.

[12] 谢莎，李浩然，李玲香，陈智，李少谦，《太赫兹通信技术综述》，通信学报，2020 年 5 月，第 41 卷第 5 期。

[13] 《5G 技术核心与增强： 从 R15 到 R16》，OPPO 研究院组编，沈嘉、杜忠达、张治、杨宁、唐海等编著，清华大学出版社，2021 年

[14] 《5G 技术核心与增强： 从 R15 到 R17》，OPPO 研究院组编，沈嘉、杜忠达、张治、石聪、杨宁、唐海等编著，清华大学出版社，2023 年（即将出版）

[15] 《5G V2X 与侧行通信》，OPPO 研究院组编，张世昌、赵振山、丁伊、林晖闵、郭雅莉、卢前溪、冷冰雪等编著，清华大学出版社，2023 年（即将出版）

[16] 《5G 终端技术演进与增强》，OPPO 研究院组编，左志松、徐伟杰、贺传峰、崔胜江、李海涛、胡奕等编著，清华大学出版社，2023 年（即将出版）

oppo